

Análisis de Estabilidad de un Control Crucero Adaptativo Cooperativo

Máster Universitario en Sistemas Electrónicos Avanzados
Sistemas Inteligentes
Departamento de Electrónica

Presentado por:
Francisco Martín Navas Matos

Dirigido por:
Manuel Ocaña Miguel y Vicente Milanés Montero

Alcalá de Henares, a 3 de Julio de 2015

A mi familia y amigos. . .

“Empieza haciendo lo necesario, luego haz lo posible y de pronto empezarás a hacer lo imposible.”

Francisco de Asís

Agradecimientos

Este trabajo es el fruto de muchas horas de trabajo, pero también ha sido la oportunidad para conocer a unas excelentes personas.

Mención especial merece Manuel Ocaña Miguel, tutor del trabajo, por servir de apoyo, guía y ayuda durante la ejecución del proyecto.

También mencionar, la gran ayuda aportada por Vicente Milanés Montero, ya que sin él nunca se hubiera realizado este trabajo.

Otras personas que no me puedo dejar atrás, son sin duda mis compañeros de laboratorio. Eduardo José Molinos Vicente, Noelia Hernández Parra y Ángel Llamazares Llamazares. Gracias a ellos, por la ayuda aportada antes muchos de los imprevistos.

Finalmente, no puedo olvidarme de agradecer a las personas que siempre me apoyan en todas y cada una de las decisiones que tomo en mi vida. Familia y amigos, por vuestro apoyo incondicional, este trabajo va dedicado a vosotros.

Resumen

El presente trabajo trata sobre el análisis de estabilidad de un sistema CAAC (Cooperative Adaptive Cruise Control) en un convoy de vehículos, con el fin de mejorar el problema de la congestión. Se realizará un estudio del arte de los sistemas actuales. Analizando la diferencia entre un sistema ACC (Adaptive Cruise Control) y el sistema CACC desde el punto de vista de la estabilidad, destacando cuales son las ventajas que incluye la adición de comunicación V2V. Se analizará el efecto de introducir retardos en los sistemas de comunicación en convoys de 3 vehículos. Por último, se realizarán pruebas de simulación y se llevará a cabo su implementación real en un convoy formado por tres robots Pioneer.

Palabras clave: ACC, CACC, V2V y estabilidad de cadena.

Abstract

This document deals with the stability analysis of a Cooperative Adaptive Cruise Control system (CACC) in a convoy of vehicles, in order to solve traffic congestion. A study of the art of current systems will be performed. The difference between an Adaptive Cruise Control (ACC) and CACC system will be studied for string stability, highlighting what advantages V2V communication's addition includes. The communication delay in convoys of 3 vehicles are analyzed too. Finally, simulation tests and experimental implementation in a convoy formed by three Pioneer robots, will be conducted.

Keywords: ACC, CACC, V2V and string stability.

Índice general

Resumen	vii
Abstract	ix
Índice general	xi
Índice de figuras	xiii
Índice de tablas	xix
Lista de acrónimos	xix
Lista de símbolos	xix
1 Introducción	1
2 Estudio teórico	5
2.1 Introducción	5
2.2 Estado del Arte	5
2.3 Objetivos	12
3 Sistema CACC para 3 vehículos en convoy	13
3.1 Introducción	13
3.2 Modelo Dinámico Longitudinal del Vehículo	13
3.3 Estabilidad de Cadena	14
3.4 Estrategia de Espaciamiento	15
3.5 ACC	15
3.6 Validación Sistema ACC	18
3.7 CACC	26
3.8 Validación Sistema CACC	28

4	Sistema CACC para 3 robots en convoy	37
4.1	Introducción	37
4.2	Modelo en VVEE del robot	38
4.3	Limitaciones reales robot	39
4.4	Imperfeccciones introducidas por la red inalámbrica	40
4.5	Modificación estructura de control sistema ACC	41
4.6	Validación sistema ACC mediante MATLAB/Simulink	42
4.7	Validación sistema ACC mediante Player Stage	47
4.7.1	Player Stage	47
4.7.2	Configuración	47
4.7.3	Aplicaciones cliente y validación	48
4.8	Modificación estructura de control sistema CACC	57
4.9	Validación sistema CACC mediante MATLAB/Simulink	57
4.10	Validación sistema CACC mediante Player Stage	61
4.10.1	Configuración	61
4.10.2	Aplicaciones cliente y validación	61
5	Resultados	69
5.1	Introducción	69
5.2	Entorno experimental	69
5.3	Modificaciones	73
5.4	Resultados sistema ACC	80
5.5	Resultados sistema CACC	81
6	Conclusiones y líneas futuras	85
6.1	Conclusiones	85
6.2	Líneas futuras	86
	Bibliografía	87

Índice de figuras

1.1	Serie histórica de vehículos en España.	1
1.2	Esquema Sistemas Inteligentes de Transporte	2
2.1	Primer vehículo con sistema ACC. Toyota Corolla.	6
2.2	Ilustración del montaje experimental realizado en [Naranjo et al., 2006].	6
2.3	Esquema sistema ACC con evitación de obstáculos de [Moon et al., 2009].	7
2.4	Sistema CACC para cadena formada por tres vehículos. Imagen tomada de [Naus et al., 2010b]	8
2.5	Vehículos Infiniti M56 experimentales con sistema CACC empleados en [V. Milanés et al., 2014].	9
2.6	“The Grand Cooperative Driving Challenge”. Imagen tomada de [van Nunen et al., 2012].	10
2.7	Esquema sistema CACC empleado en [V. Milanés et al., 2014].	11
3.1	Resultados para un cadena de 3 vehículos. La línea punteada representa el perfil de velocidad de un vehículo de referencia. Y las líneas continuas representan 3 vehículos, cuya posición en la cadena va de más oscuro a más claro. Imagen tomada de [Naus et al., 2010a]	14
3.2	Estructura de control sistema ACC. Imagen tomada de [Naus et al., 2010c].	16
3.3	Dos vehículos en cadena. Consideración de la extensión de la longitud del vehículo como $l'_i = l_i + x_{r,0,i}$. Imagen tomada de [Naus et al., 2010c].	17
3.4	Estructura sistema ACC con política de espaciamiento. Imagen tomada de [Naus et al., 2010c].	17
3.5	Cadena de 3 vehículos equipado con sistema ACC. Modelo de vehículo $1/s^2$	19
3.6	Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos iguales con modelo $1/s^2$ equipados con sistema ACC siguiendo un vehículo de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$	21
3.7	Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres vehículos iguales con modelo $1/s^2$ equipados con sistema ACC siguiendo un vehículo de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$	21
3.8	Cadena de 3 vehículos equipados con sistema ACC. Modelo de vehículo real.	22
3.9	Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos iguales con modelo real equipados con sistema ACC siguiendo un vehículo de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$	22

3.10 Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres vehículos iguales con modelo real equipados con sistema ACC siguiendo un vehículo de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$.	23
3.11 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos distintos con modelo real equipados con sistema ACC siguiendo un vehículo de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$.	23
3.12 Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres vehículos distintos con modelo real equipados con sistema ACC siguiendo un vehículo de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$.	24
3.13 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos distintos con modelo real equipados con sistema ACC siguiendo un vehículo de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 2s$.	24
3.14 Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres vehículos distintos con modelo real equipados con sistema ACC siguiendo un vehículo de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 2s$.	25
3.15 Estructura de control CACC. Imagen tomada de [Naus et al., 2010c].	26
3.16 Gráfico de contorno, indicando el $h_{d,i,min}$ para el que se asegura la estabilidad del sistema, en función de $\omega_{c,i}$ y θ_i . Imagen tomada de [Naus et al., 2010c].	27
3.17 Cadena de 3 vehículos equipado con sistema CACC. Modelo de vehículo $1/s^2$.	28
3.18 Cadena de 3 vehículos equipado con sistema CACC. Modelo de vehículo real.	29
3.19 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos iguales con modelo $1/s^2$ equipados con sistema CACC sin retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 0,1s$.	31
3.20 Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres vehículos iguales con modelo $1/s^2$ equipados con sistema CACC sin retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 0,1s$.	31
3.21 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos iguales con modelo $1/s^2$ equipados con sistema CACC con retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 0,1s$.	32
3.22 Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres vehículos iguales con modelo $1/s^2$ equipados con sistema CACC con retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 0,1s$.	32
3.23 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos iguales con modelo real equipados con sistema CACC con retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 0,9s$.	33
3.24 Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres vehículos iguales con modelo real equipados con sistema CACC con retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 0,9s$.	33
3.25 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos iguales con modelo real equipados con sistema CACC con retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$.	34

3.26 Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres vehículos iguales con modelo real equipados con sistema CACC con retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$.	34
3.27 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos distintos con modelo real equipados con sistema CACC con retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$.	35
3.28 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos distintos con modelo real equipados con sistema CACC con retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$.	35
4.1 Robot P3DX.	37
4.2 Robot P3AT.	38
4.3 Láser Hokuyo URG-04LX.	40
4.4 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Caso continuo.	43
4.5 Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Caso continuo.	43
4.6 Resultados de simulación de posición reactiva para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Caso continuo.	44
4.7 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Caso discreto.	44
4.8 Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Caso discreto.	44
4.9 Resultados de simulación de posición reactiva para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Caso discreto.	45
4.10 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 2s$. Caso discreto.	45
4.11 Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 2s$. Caso discreto.	45
4.12 Resultados de simulación de posición reactiva para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 2s$. Caso discreto.	46
4.13 Mundo creado en Stage para la verificación del sistema ACC.	48
4.14 Esquema configuración simulación sistema ACC.	48
4.15 Diagrama aplicación cliente robot0 simulación sistema ACC.	51

4.16 Diagrama aplicación cliente robot1 simulación sistema ACC.	52
4.17 Diagrama aplicación cliente robot2 simulación sistema ACC.	53
4.18 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Player Stage.	54
4.19 Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Player Stage.	54
4.20 Resultados de simulación de posición relativa para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Player Stage.	55
4.21 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage.	55
4.22 Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage.	56
4.23 Resultados de simulación de posición relativa para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage.	56
4.24 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Caso continuo.	58
4.25 Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Caso continuo.	58
4.26 Resultados de simulación de posición relativa para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Caso continuo.	59
4.27 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Caso discreto.	59
4.28 Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Caso discreto.	60
4.29 Resultados de simulación de posición relativa para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Caso discreto.	60
4.30 Esquema configuración simulación sistema CACC.	61
4.31 Diagrama aplicación cliente robot1 simulación sistema CACC.	63
4.32 Diagrama aplicación cliente robot2 simulación sistema CACC.	64

4.33 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage.	65
4.34 Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage.	65
4.35 Resultados de simulación de posición relativa para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage.	66
4.36 Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage. Simulación 850 s.	66
4.37 Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage. Simulación 850 s.	67
4.38 Resultados de simulación de posición relativa para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage. Simulación 850 s.	67
5.1 Robot Pioneer P3-AT. Leader de la cadena.	70
5.2 Robot Pioneer P3-AT. Segundo robot de la cadena.	70
5.3 Robot Pioneer P3-DX. Tercer y último robot de la cadena.	71
5.4 Pasillo al lado del laboratorio de investigación DO202 de la Escuela Politécnica de la Universidad de Alcalá.	71
5.5 Cadena formada por 3 robots para la realización de las pruebas experimentales pertinentes.	72
5.6 Esquema configuración sistema ACC. Prueba real.	73
5.7 Esquema configuración sistema CACC. Prueba real.	74
5.8 Rampas de velocidad. Comprobación error en la medida de velocidad.	74
5.9 Modelado error odometría en velocidad frente velocidad comandada.	75
5.10 Diagrama aplicación cliente robot1 experimental sistema ACC.	76
5.11 Diagrama aplicación cliente robot2 experimental sistema ACC.	77
5.12 Diagrama aplicación cliente robot1 experimental sistema CACC.	78
5.13 Diagrama aplicación cliente robot2 experimental sistema CACC.	79
5.14 Resultados experimentales de velocidad para una cadena de tres robots: P3AT-P3AT-P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$	80
5.15 Resultados experimentales de aceleración para una cadena de tres robots: P3AT-P3AT-P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$	81
5.16 Resultados experimentales de distancia relativa para una cadena de tres robots: P3AT-P3AT-P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$	81

5.17 Resultados experimentales de velocidad para una cadena de tres robots: P3AT-P3AT-P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$	82
5.18 Resultados experimentales de aceleración para una cadena de tres robots: P3AT-P3AT-P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$	82
5.19 Resultados experimentales de distancia relativa para una cadena de tres robots: P3AT-P3AT-P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$	83

Índice de tablas

3.1	Parámetros cadena de vehículos. Caso modelo $1/s^2$. Tráfico Homogéneo.	19
3.2	Parámetros cadena de vehículos. Caso modelo real. Tráfico homogéneo.	20
3.3	Parámetros cadena de vehículos. Caso modelo real. Tráfico heterogéneo.	20
3.4	Parámetros cadena de vehículos. Caso modelo ideal. Tráfico homogéneo. Sin retardo. . . .	29
3.5	Parámetros cadena de vehículos. Caso modelo ideal. Tráfico homogéneo. Con retardo. . .	29
3.6	Parámetros cadena de vehículos. Caso modelo real. Tráfico homogéneo. Con retardo. . . .	30
3.7	Parámetros cadena de vehículos. Caso modelo real. Tráfico heterogéneo. Con retardo. . . .	30
4.1	Tabla comparativa Robots P3DX y P3AT.	40
4.2	Parámetros cadena de P3DX. Tráfico homogéneo. Tiempo continuo.	43
4.3	Parámetros cadena de P3DX. Tráfico homogéneo. Tiempo discreto.	43
4.4	Parámetros cadena de P2DX. Tráfico homogéneo. Player Stage.	51
4.5	Parámetros cadena de P3DX. Sistema CACC. Tráfico homogéneo. Tiempo continuo. . . .	58
4.6	Parámetros cadena de P3DX. Sistema CACC. Tráfico homogéneo. Tiempo discreto. . . .	58
5.1	Parámetros resultados experimentales sistema ACC.	80
5.2	Parámetros resultados experimentales sistema CACC.	82

Capítulo 1

Introducción

Hoy día, uno de los principales problemas del tránsito de vehículos en las ciudades es la congestión. Este problema ha ido en aumento en gran parte del mundo, y todo indica que seguirá agravándose, constituyendo un peligro sobre la calidad de la vida urbana. Su principal manifestación es la progresiva reducción de las velocidades de circulación, que se traduce en incrementos de tiempos de viaje (que fomenta el comportamiento agresivo de los conductores), de consumo de combustibles, de otros costos de operación, de contaminación atmosférica y de accidentes de tráfico.

La congestión es causada principalmente por el uso intensivo del automóvil. El vehículo posee ventajas en términos de facilitar la movilidad personal, y otorgar sensación de seguridad y aún de estatus en países en vías de desarrollo. Sin embargo, es poco eficiente para el traslado de las personas, hasta el punto que cada ocupante del vehículo produce 11 veces la congestión atribuible a cada pasajero de transporte público en horas punta.

En los últimos años, concretamente a partir de los años 90, el aumento del número de vehículos ha sido exponencial, fruto de diversos factores como el aumento del poder adquisitivo de las clases socioeconómicas de ingresos medios, el mayor acceso al crédito, la reducción relativa de los precios y una mayor oferta de vehículos usados. En la Figura 2.4 se observa como a partir de los años 90 el aumento de vehículos es más pronunciado.

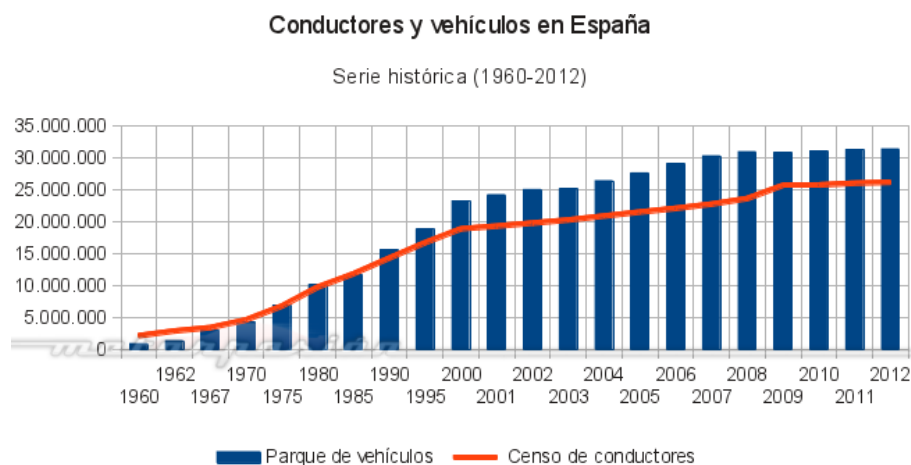


Figura 1.1: Serie histórica de vehículos en España.

Los costes de la congestión son elevados. A título de ejemplo puede señalarse que, aumentar en promedio la velocidad en 1 km/h y los de transporte público en 0.5 km/h implicaría una reducción de

años, adquiere una enorme transcendencia puesto que las tecnologías de la información permiten ya emitir información móvil en cualquier lugar y en tiempo real.

Los ITS van a variar según la tecnología aplicada, va desde sistemas de navegación [Obradovic et al., 2007]; sistemas de control de señalización en tráfico [Mu et al., 2010]; empleo de visión artificial [de Fuentes et al., 2012]; así como aplicaciones más avanzadas que integran la recepción de datos en tiempo real y retroalimentación con otras fuentes de información, como aparcamiento asistido [Wada et al., 2003], planificación de trayectorias [Lucas and Guettier, 2012] o sistemas de conducción automatizada [Wu et al., 2012]. A continuación se muestran alguna de las aplicaciones más destacables:

- Sistemas de notificación de emergencias. Se trata de un sistema de llamada de emergencia activado manualmente por los ocupantes del vehículo, o bien activado por los sensores del vehículo tras un accidente.
- Sistemas para evitar colisiones.
- Límites de velocidad variables. Límites de velocidad que varían según el nivel de congestión y otros factores de la vía.
- Secuenciación dinámica de semáforos. Trata de emular el comportamiento de un policía de tráfico.
- Sistemas cooperativos. Hace referencia a la adicción de información entre vehículos *Vehicle-to-Vehicle (V2V)* y entre el vehículo y las infraestructuras *Vehicle-to-Infrastructure (V2I)*. Dicha información se emplea para la detección de eventos, actuando de forma que la conducción sea segura y eficiente.

Centrándonos en la última aplicación, el hecho de que los vehículos sean conducidos por personas es el problema que impide la mejora del problema que nos ocupa, la congestión. Concretamente, la limitada percepción humana de las condiciones viales causa atascos, accidentes de tráfico y aumento de las distancias de seguridad necesarias. De ahí que sea necesario la obtención de información adicional bien por sensores o redes inalámbrica, o por ambos.

Para la mejora del flujo de tráfico es necesario pasar por el concepto de pelotón de vehículos. “Platooning” hace referencia al uso de un “enganche” entre vehículos a fin de reducir la distancia entre los mismos y mejorar la capacidad de transporte [Ren and Green, 1994]. La implementación de estos sistemas de enganche se puede realizar desde puntos de vista distintos: Construcción de autopistas automatizadas o modificación de los vehículos.

En los sistemas de autopistas automatizadas el vehículo detecta puntos magnetizados en la propia autopista que lo guían por ella [Asaoka and Ueda, 1996]. Su investigación no tuvo éxito, finalmente se centró la investigación en vehículos autónomos en lugar de infraestructura especializada.

Desde el punto de vista del propio vehículo existen distintos proyectos que evitan cambios costosos en la infraestructura vial. Concretamente, se destaca el desarrollo de sistemas inteligentes capaces de ajustar velocidad de forma automática en función de las acciones del vehículo predecesor [Varaiya, 1993]. Mediante este controlador de velocidad se busca reducir la distancia intervehicular entre los elementos de la cadena a fin de mejorar el flujo de tráfico.

Así el presente trabajo se centra en el diseño de un controlador de velocidad para un vehículo según las acciones del vehículo predecesor. Concretamente se llevará a cabo un estudio comparativo entre dos sistemas distintos: *Control Crucero Adaptativo (ACC)* y *Control Crucero Adaptativo Cooperativo (CACC)*. El último de ellos, es una mejora del primero y es el considerado cooperativo, con información V2V gracias a la existencia de una red inalámbrica. La comparación se realizará en términos de estabilidad de cadena.

El proyecto se estructura en un total de 6 capítulos:

- En el capítulo 2 del presente proyecto, se realiza el estudio teórico de los trabajos más relevantes para el desarrollo de un sistema capaz de realizar ajustes de velocidad de forma automática según las acciones del vehículo predecesor. En función de este estudio previo, se determinará la tecnología a emplear y los objetivos del trabajo.
- Los capítulos 3 y 4 albergan la fase de desarrollo teórico del proyecto. En estos capítulos se definen las bases teóricas de la tecnología a implementar para obtener el controlador de velocidad deseado, comprobándose su correcto funcionamiento a través de distintos programas de simulación. Será importante centrarse en el estudio de la estabilidad del controlador, y que factores pueden afectar a la misma.
- En el capítulo 5 se mostrarán los resultados experimentales obtenidos. A través de los mismos, se podrá concluir si simulación y mundo real tienen resultados similares; y en caso contrario, establecer las modificaciones necesarias para la adaptación de nuestro algoritmo a la plataforma experimental que se emplee.
- Por último, en el capítulo 6, derivado de todo el trabajo desarrollado a lo largo del proyecto se expondrán las conclusiones y posibles líneas futuras de trabajo.

Capítulo 2

Estudio teórico

2.1 Introducción

En este capítulo se realiza un estudio exhaustivo de las distintas tecnologías usadas a lo largo de los años para el desarrollo de un sistema capaz de realizar ajustes de velocidad de forma automática según las acciones del vehículo predecesor. Recordamos que el objetivo principal de este tipo de sistemas es la reducción de la distancia entre vehículos a fin de mejorar el flujo de tráfico y evitar la congestión. Concretamente, el estado del arte se centra en sistemas [ACC](#) y [CACC](#), teniendo en cuenta distintas tecnologías de implementación, pruebas experimentales, competiciones llevada a cabo, consideraciones de red inalámbrica, maniobras, etc.

Por último, a partir de lo estudiado en el estado del arte se concretan los objetivos del presente trabajo.

2.2 Estado del Arte

El primer control crucero de velocidad data del año 1960. El mismo, podría ser clasificado como [Control Crucero Convencional \(CCC\)](#), permitiendo establecer una consigna de velocidad al vehículo, haciendo de la conducción una tarea mucho más cómoda. En aquellos años, la implementación de un controlador de velocidad con adaptación a las acciones del vehículo que le precede era casi imposible.

No es hasta la década de los 80, cuando dicha adaptación empezó a ser posible. Esto se debe a la revolución introducida por la aparición de los microprocesadores. Con el incremento en disponibilidad, funcionalidad, flexibilidad y el decremento de los precios de los microchips, las empresas automovilísticas empiezan a desarrollar controladores de velocidad mejores y de una forma más eficiente que los primeros sistemas mecánicos que aparecieron.

El primer sistema “inteligente” disponible capaz de realizar ajustes de velocidad de forma automática data de 1996, y fue el denominado [ACC](#) [[Serafin, 1996](#)]. Como ocurre en el caso del [CCC](#), también se puede elegir una determinada velocidad a través de una interfaz de usuario, pero en este caso, cuando un vehículo es detectado por el lidar o radar, la velocidad del vehículo se adapta al predecesor basándose en un determinado “head time” (el “head time” o tiempo de alcance, hace referencia al tiempo que tarda en alcanzar la posición del vehículo predecesor a una determinada velocidad). En este último caso, las tareas a realizar por el conductor se reducen de forma considerable porque la distancia al vehículo predecesor se regula de forma automática [[Weinberger et al., 2001](#)].

Ya existen distintos vehículos con sistema ACC en el mercado. La primera implementación del sistema se lleva a cabo en 1997, y se trata de un Toyota (ver figura 2.1) que comenzó a ofertar un sistema lidar, que permitía el control de velocidad actuando sobre el acelerador, pero no sobre los frenos. A partir de ese momento y hasta el presente año, distintas variantes del sistema se han ido incorporando a marcas como Jaguar, Nissan, BMW, Infiniti, Audi, etc, introduciendo mejoras como actuación sobre los frenos, asistente en situación de atasco o sensores radar de un mayor rango de operación. Aún con toda esta variedad comercial disponible, el diseño y las estrategias de control que siguen estos dispositivos comerciales son poco conocidos debido a la alta discreción por parte de los fabricantes.



Figura 2.1: Primer vehículo con sistema ACC. Toyota Corolla.

Por otra parte, en el ámbito académico existen distintos enfoques para el desarrollo del ACC. La dirección adoptada, es la ampliación del sistema ACC convencional, donde únicamente se tiene control sobre el acelerador, a un sistema ACC que también tenga control sobre el freno, para poder emplear el control crucero en aquellas situaciones donde las velocidades sean bajas o nulas, dígame atascos o ciudades. Las técnicas de control utilizadas son varias:

Un ACC implementado mediante técnicas de control borrosa se presenta en [Naranjo et al., 2006]. La distancia al vehículo predecesor se conoce a través de localización GPS. Se disponen de dos controladores diferenciados, uno para el acelerador y otro para el freno. Así se contempla la posibilidad de conducción urbana, o dentro de atascos, permitiendo que la velocidad del vehículo predecesor sea pequeña o incluso nula. Las entradas empleadas para el control de ambos son error de velocidad, aceleración, error en el tiempo de espaciamiento y derivada de dicho error. A partir de las distintas reglas lógicas se actuará sobre acelerador o freno en distintos niveles de intensidad. Además, el empleo de un control borroso les permite desarrollar maniobras a través de entrenamiento que de otra forma serían complicadas de acometer. Mencionar también que se realizaron pruebas satisfactorias con un par de Citroen Berlingo. En la figura 2.2 se puede observar los vehículos utilizados durante dichas pruebas. El primero de ellos, fue conducido por una persona, comprobándose la correcta conservación de una distancia de seguridad por parte del segundo en función de los distintos parámetros medidos.

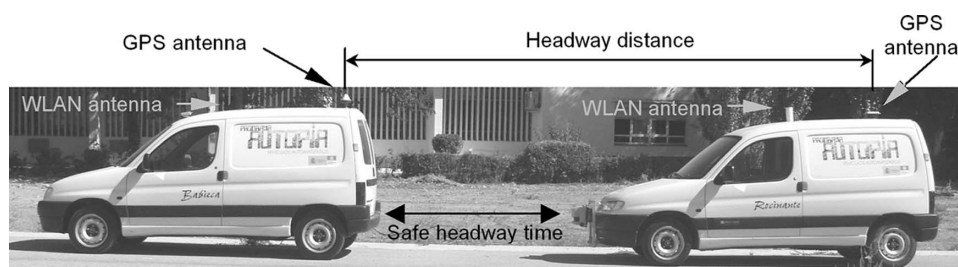


Figura 2.2: Ilustración del montaje experimental realizado en [Naranjo et al., 2006].

Otra técnica de control empleada se basa en modelo predictivo [Naus et al., 2010a], parametrizando características clave del sistema ACC, con el objetivo de hacer más sencilla e intuitiva la variación de su funcionamiento dependiendo de la situación en la que el vehículo se encuentre. Para la obtención de datos del entorno se emplea radar. Para que la variación del modo de operación sea sencilla para el usuario, la cantidad de parámetros claves que se pueden variar deben ser los mínimos e intuitivos de utilizar. Los parámetros clave utilizados se encuentran relacionados directamente con confort y seguridad. Concretamente se emplea un *Model Predictive Control (MPC)*, ya que el mismo permite incluir restricciones y compensaciones eligiendo una determinada función de coste. Pero la elección principal de ésta técnica de control recae en la posibilidad de imitar la forma de conducción humana, lo cual es muy importante para su aceptación en el mercado.

[Moon et al., 2009] nos muestra un controlador ACC capaz de evitar colisiones. En este caso, el algoritmo de control también se diseña para que el comportamiento del vehículo sea parecido al que tendría si fuese conducido por una persona, añadiendo comportamiento seguro ante situaciones de frenada brusca. Para ello se opera el sistema en tres modos distintos: “confort”, “large-deceleration” and “severe-braking”. El objetivo de control en el modo “confort” es mantener una determinada distancia de seguridad al vehículo predecesor, haciendo que el proceso sea natural para el conductor. Si la situación del tráfico, basándose en unos índices que la describen, es “large-deceleration”, el sistema informa al conductor de la situación y procede a decelerar. En el último de los casos, “severe-braking mode”, se genera una frenada de emergencia para evitar un choque con el vehículo delantero. Los índices que se eligieron para la comprobación del sistema propuesto, estaban basados en datos tomados durante el funcionamiento normal de un vehículo. En la figura 2.3, se muestra un esquema del sistema completo. Dispone de un controlador de alto nivel que emplea velocidad, distancia relativa, y velocidad relativa para la obtención de los índices y de la aceleración deseada, de esta forma en función de estos parámetros, se varía entre los distintos modos de conducción arriba descritos. El controlador de más bajo nivel es el que se encarga de la actuación de freno y acelerador según la aceleración deseada. Las técnicas de control seguidas sobre acelerador y freno se basan en dinámica inversa, así como en el empleo de un *Proporcional-Integral-Derivativo (PID)* con feedforward.

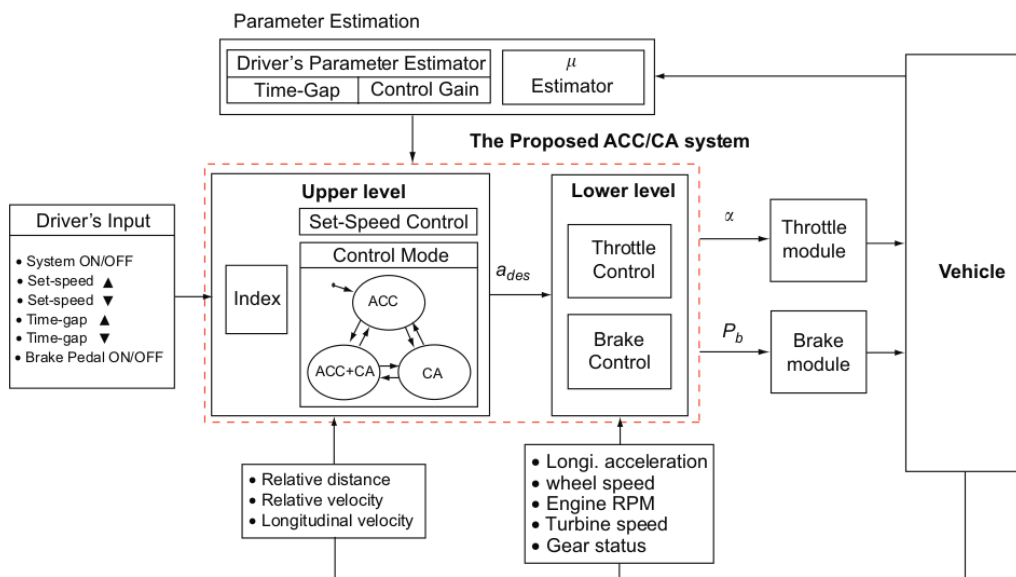


Figura 2.3: Esquema sistema ACC con evitación de obstáculos de [Moon et al., 2009].

Todas estas técnicas de control han obtenido resultados satisfactorios. Ahora bien, ¿cuál de ellas sería la mejor técnica? En [Milanés et al., 2012], se lleva a cabo un estudio comparativo entre técnicas de

control clásica y control borroso para dicho sistema ACC con posibilidad de maniobras “STOP&GO”. El controlador borroso tiene como ventaja la sencilla adaptación entre simulación y mundo real al basarse en comportamiento humano, en vez de emplear algún modelo matemático. El controlador clásico en cambio, tiene como ventaja que proporciona una acción mucho más suave en aceleración y freno, incrementando así el confort de los ocupantes del vehículo. Por tanto, siempre se elegirá un control clásico frente a un controlador borroso, a menos que el modelo del vehículo del que se disponga no represente fielmente la realidad.

Ya es conocido que un sistema ACC sólo obtiene información sobre la distancia de su predecesor mediante el empleo de los sensores que se encuentran en la parte delantera del vehículo (típicamente un lidar o un radar), o bien a través de GPS. Dichos sensores pueden tener problemas de ruido, interferencias, exactitud e incertidumbre, lo que requiere que las salidas sean filtradas antes de su uso para el control. Este hecho limita la precisión y la capacidad de respuesta del ACC para realizar el seguimiento del vehículo delantero debido a los retardos introducidos en el filtrado [Nowakowski and Shladover, 2011]. Añadir a los datos de los sensores información adicional sobre el vehículo predecesor a través de una comunicación inalámbrica entre vehículos, permitiría reducir dicha limitación. Un ejemplo de ello es el caso del CACC, que se puede definir como la extensión del ACC al que se le añade intercambio de información entre vehículos de forma inalámbrica. Como ventajas presenta una mayor precisión, una respuesta más rápida a cambios, reducción significativa de la distancia entre vehículos al permitir tiempo de alcance menores y mejora de la estabilidad de cadena [Shladover et al., 2010].

El mercado automovilístico aún no dispone de vehículos con este tipo de sistemas de control. Pero en el ámbito de la investigación, son numerosos los artículos que tratan el tema; desde distintas técnicas de control CACC, distintas técnicas de análisis de estabilidad de cadena, consideraciones reales de la red inalámbrica y competiciones, hasta estudios comparativos entre ACC y CACC de afección a la mejora del flujo de tráfico.

Considerando la definición de estabilidad de cadena para un pelotón de vehículos, la misma podría definirse como la no amplificación de perturbaciones a lo largo de la cadena, por ejemplo, que no haya amplificación de la señal de velocidad del vehículo $i = 1$ a un vehículo $i > 1$ en la Figura 2.4.

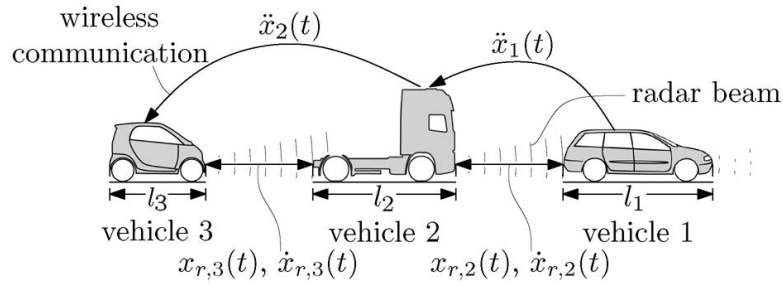


Figura 2.4: Sistema CACC para cadena formada por tres vehículos. Imagen tomada de [Naus et al., 2010b]

Ahora bien, las señales que se evalúan para su análisis varían. Si se centra en evitar colisiones, se considera el error entre la distancia intervehicular deseada y la actual. Así, el comportamiento del sistema se considera estable siempre que dicho error no se amplifique a medida que aumenta el índice del vehículo considerado dentro de la cadena [Yanakiev and Kanellakopoulos, 1998] [Sheikholeslam and Desoer, 1993] [Swaroop et al., 1994]. En [Liang and Peng, 1999] se presenta una modificación de esta idea, considerando la amplificación de oscilaciones en las distancias intervehiculares directamente.

En el resto de casos, la gran mayoría de los autores consideran amplificación de oscilaciones en posición relativa, velocidad o aceleración [Peppard, 1974] [Khatir and Davison, 2004] [Huppe et al., 2003] [Shaw and

[Hedrick, 2007a]. Concretamente, los resultados se suelen mostrar en términos de velocidad o aceleración, evaluando sobre los mismos la estabilidad de cadena, como en [Ioannou and Chien, 1993] [Ioannou and Chien, 2002] [Naus et al., 2010a].

Respecto a las distintas reglas de espaciamiento entre vehículos, las más utilizadas son dos: una distancia intervehicular siempre constante, o otra dependiente de la velocidad, y cuyo tiempo de alcance es establecido de forma “offline” a un valor constante. En [Naus et al., 2010b] se analiza el efecto de elegir una u otra estrategia de espaciamiento sobre la estabilidad del sistema. El utilizar una distancia entre vehículos siempre constante, sólo tendría justificación como forma de reducción de la fuerza de arrastre para la reducción del consumo de combustible en vehículos pesados. En cualquier otro caso, es mejor la opción de “head time” constante, ya que la estabilidad de cadena no sería alcanzable sin comunicación en caso contrario.

También se ha estudiado de forma estadística el efecto de tener estrategias de espaciamiento con “head time” variable [van Willigen et al., 2011]. Concretamente, se tiene en consideración incertidumbres en la información procedente de la red inalámbrica y de los sensores, así como la velocidad del vehículo. En base a esto, se propone un modelo que es capaz de aproximar cual es el mínimo “head time” que se podría adoptar. Los “head time” mínimos que dicho algoritmo calcula no son menores que los permitidos para hacer el sistema estable. Por último, mencionar la existencia de una muy baja probabilidad de colisión, aproximadamente un 0.1 %.

En los últimos años, *California Partners for Advanced Transportation technology program (PATH)* ha estudiado numerosos aspectos prácticos de implementación del sistema CACC, desde control con estrategias de espaciamiento que tiene en cuenta información de un vehículo de referencia, del predecesor, del predecesor y el leader de la cadena, con identificación dentro de la cadena para cada uno de los vehículos, o con líderes intermedios en el caso de que la cadena sea muy larga [Swaroop, 1997]; condiciones de tráfico heterogéneo y homogéneo, y como la estabilidad de cadena se ve afectada por ello [Shaw and Hedrick, 2007b]. En el caso heterogéneo se estudia como afecta que la atenuación o amplificación de las señales a lo largo de la cadena difiera debido a la dinámica de cada uno de los vehículos; limitaciones de los actuadores [Huang and Ren, 1997]; y resultados experimentales de un sistema CACC a partir del ACC comercial presente en el vehículo [V. Milanés et al., 2014]. En este último caso, el sistema se implementó en 4 coches Infiniti M56 equipados con *Dedicated Short Range Communications (DSRC)* para el intercambio de información entre vehículos. Los vehículos empleados se muestran en la figura 2.5. El controlador diseñado toma información del vehículo predecesor, introduciendo un filtro feedforward en el control, de forma que la distancia intervehicular se redujo de forma significativa. Estas pruebas también sirvieron como método de comparación de los dos sistemas de control crucero vistos hasta ahora.



Figura 2.5: Vehículos Infiniti M56 experimentales con sistema CACC empleados en [V. Milanés et al., 2014].

En mayo de 2011, tuvo lugar en Helmond “The Grand Cooperative Driving Challenge”, ofreciendo la posibilidad a los distintos equipos participantes, de desarrollar y comparar sus soluciones de conducción cooperativa en un ambiente competitivo [van Nunen et al., 2012]. En esta competición, nueve vehículos procedentes de distintas instituciones europeas de investigación condujeron en dos pelotones alineados haciendo uso de distintas técnicas de control CACC. Los participantes eran posicionados en una carretera de dos carriles con un leader centrado entre ambos carriles, como se puede observar en la imagen 2.6. El leader envía información de su posición, velocidad y aceleración a través de una red inalámbrica. Las pruebas se realizaron tanto en autovía como ciudad. Los participantes aplicaron distintas técnicas de control en la competición (similares a las vistas para el sistema ACC, con inclusión de información inalámbrica): en base a controladores *Proporcional (P)* o *Proporcional-Derivativo (PD)* feedback/feed-forward [Lidström et al., 2012] [Nieuwenhuijze et al., 2012] [Güvenç et al., 2012], modelos de control predictivo como el empleados en [Geiger et al., 2012] y [Kianfar et al., 2012]. Las técnicas de control borroso, fueron descartadas por la alta complejidad que supone el análisis de su estabilidad de cadena. El ganador fue el grupo alemán Annieway.



Figura 2.6: “The Grand Cooperative Driving Challenge”. Imagen tomada de [van Nunen et al., 2012].

Otros aspectos a tener en cuenta son las distintas maniobras de incorporación o salida del vehículo al/del pelotón. En [Kesting et al., 2010], se mejora un sistema ACC para evitar frenadas bruscas en el caso de maniobras de incorporación de un vehículo al pelotón. El hecho de que un vehículo se incorpore a la cadena, hace que el vehículo que se encuentre detrás de la nueva incorporación frene bruscamente. Como solución se plantea el empleo de un modelo de aceleración constante que sea capaz de implementar una reacción más relajada a la maniobra de incorporación, sin chocarse. En [V. Milanés et al., 2014] se han tenido en cuenta ambos tipos de maniobras para el desarrollo de un sistema CACC, y ha sido probado en un pelotón de 4 Infiniti M56s. La idea es la misma, se trata de establecer una saturación en aceleración o deceleración según la preferencia del conductor. En este caso, se disponen de dos modos de funcionamiento distintos: el caso en el que un vehículo sale de la cadena, y su predecesor aceleraría (dentro del rango máximo permitido) hasta alcanzar al siguiente; o bien, si no hay siguiente, hasta llegar a la velocidad de cruce impuesta por el conductor; y la maniobra a realizar en el caso de incorporación de vehículo, muy similar a la estudiada en [Kesting et al., 2010]. En la figura 2.7 se muestra un esquema del sistema CACC, donde se observa un retardo en la comunicación inalámbrica modelado por $D(s)$, así como los dos modos de funcionamiento planteados. Uno para cuando exista un vehículo predecesor o maniobras de incorporación; y otro para cuando no lo haya o en maniobras de salida de la cadena, donde la velocidad viene impuesta bien por el alcance a otro vehículo, o por el propio usuario.

La regulación de la distancia entre vehículos mediante el empleo de información del vehículo precedente a través de una red inalámbrica hace necesario la visión del problema desde el punto de vista de un *Sistemas de Control en Red (NCS)*. Existen pocos estudios referentes a las imperfecciones que pueden

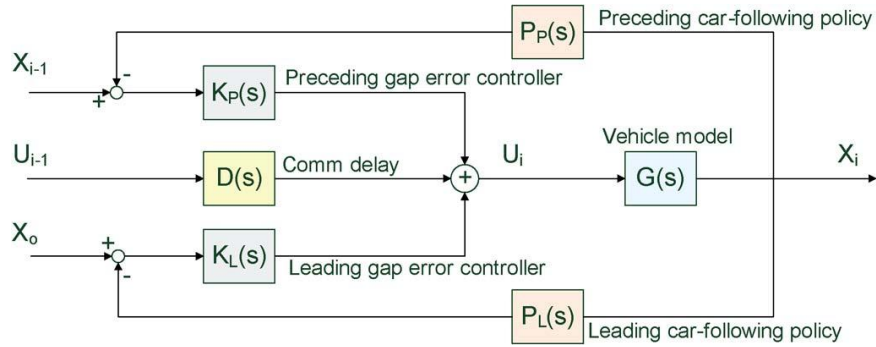


Figura 2.7: Esquema sistema CACC empleado en [V. Milanés et al., 2014].

introducir estas redes inalámbricas y cómo afecta la misma al control. En [Liu et al., 2001] se lleva a cabo el análisis del efecto de tiempo de retardo constante sobre la estabilidad de cadena del controlador. El compromiso de la estabilidad de cadena viene directamente impuesto por la magnitud del retardo introducido por la red inalámbrica. Cuando todos los vehículos vean un retardo pequeño, la estabilidad de cadena no tiene ningún problema en mantenerse. Sin embargo, la consideración de un retardo constante, no tiene en cuenta la aleatoriedad de una red inalámbrica en el valor de sus retardos. Recientemente, en [Öncü et al., 2014] realizan un estudio más exhaustivo, llevando a cabo un análisis completo de los efectos de una red inalámbrica sobre la estabilidad y cómo estos afectan al “head time” mínimo alcanzable. Desarrollan una herramienta de análisis de estabilidad de cadena de un sistema CACC desde el punto de vista de la red. En vez de optar por el análisis de afección del retardo constante en tiempo continuo, optan por un análisis en tiempo discreto, que además incorpora los efectos de muestreo y *Zero Order Hold (ZOH)*.

No existen resultados experimentales de afección de las imperfecciones de la red inalámbrica a la estabilidad de cadena del sistema CACC según el tipo de red inalámbrica que se elija.

El impacto sobre el flujo de tráfico del empleo de un sistema ACC o CACC también ha sido estudiado ampliamente mediante simulaciones.

Particularmente, el sistema ACC de General Motors se usa en [Jerath and Brennan, 2012], donde la capacidad de la autovía incrementa de forma notable cuando todos los vehículos se encuentran equipados con ACC. Además, en estas simulaciones, es importante mencionar que incluso con una alta penetración de mercado de vehículos equipados con ACC, que una pequeña parte no dispongan de este tipo de tecnología sería suficiente para seguir causando congestión de forma ocasional.

Por otra parte, atendiendo a resultados de sistemas CACC, [van Arem et al., 2012] presenta el impacto de utilizar sistemas de control CACC en el problema de la congestión. Para ello, se emplea un simulador de tráfico, en el que la situación simulada representada un atasco debido al cierre de un carril. Se llega a la conclusión, de que la mejora sólo es notable ante una elevada tasa de vehículos equipados con el sistema, más de un 40 %.

Más tarde, modelos sencillos para vehículos con ACC y CACC se presentan en [Shladover et al., 2012], donde se ve que un incremento en vehículos CACC originan un incremento de la capacidad mucho mayor que el que produciría la misma cantidad de coches con ACC. Comparando, para un resultado óptimo en la mejora del tráfico, el sistema ACC necesita de un 70 % mientras que el sistema CACC necesita un 40 % de penetración.

Ahora bien, todas estas simulaciones de mejora o empeoramiento de la capacidad en autovías usan modelos basados en aspectos teóricos en vez de resultados experimentales. Esto es, hasta ahora no existe una relación directa entre los resultados experimentalmente obtenidos y las simulaciones realizadas para

evaluar el impacto sobre el tráfico de sistemas [ACC](#) y [CACC](#).

2.3 Objetivos

El objetivo principal del presente proyecto es el diseño de un control crucero de velocidad cooperativo. Concretamente, y en base a lo visto en el apartado [2.2](#), la técnica empleada para su diseño será un controlador [PD](#) con filtro feedforward para la parte correspondiente a la comunicación. La elección de esta técnica de control, recae en la disponibilidad de un modelo matemático fiable de los robots que se emplearán en la fase experimental del proyecto, así como que el análisis de estabilidad de cadena resulta mucho más sencillo que con técnicas de control “fuzzy” o [MPC](#).

En paralelo al desarrollo de dicho sistema [CACC](#), siempre se realizará un estudio comparativo con su predecesor, el sistema [ACC](#). De esta forma, siempre se tendrá un sistema de referencia con el que comparar; destacando cuales son las ventajas que incluyen la adicción de comunicación [V2V](#).

Como pelotón de vehículos para la realización de las pruebas experimentales se utilizarán robots Pioneer, debido a la indisponibilidad de vehículos reales en el laboratorio, concretamente se emplearán un P3DX y dos P3AT.

Previo a la realización de dichas pruebas experimentales es necesaria la definición de conceptos básicos respecto a su estructura de control, política de espaciamiento, estabilidad de cadena e imperfecciones introducidas por el control en red.

Una primera aproximación al controlador final, se realizará utilizando un modelo longitudinal de la dinámica de un vehículo. Con dicho modelo se estudiarán las limitaciones de estabilidad de cadena según tengamos un sistema [ACC](#) o [CACC](#), vehículos homogéneos o heterogéneos entre sí, e imperfecciones como introducción de retardos en la conexión inalámbrica. El objetivo será la familiarización con el sistema [CACC](#) a través de los resultados obtenidos mediante la herramienta de simulación MATLAB/Simulink. Además, se determinará si el empleo de un modelo generalizado de vehículo para el estudio de la estabilidad de cadena, sirve como aproximación para determinar la estabilidad de cadena en otros casos, dígase la cadena formada por los 3 robots pioneer, cuyas pruebas experimentales se llevarán a cabo.

Una vez se tiene una base de conocimiento lo suficientemente amplia sobre el controlador a desarrollar, actuadores, sensores y red inalámbrica se modificará el controlador [CACC](#) para su adaptación a los robots Pioneer. Mediante los resultados obtenidos en MATLAB/Simulink se comprobará el correcto funcionamiento del mismo. Posterior a esto, será necesario la traducción del sistema de control planteado a lenguaje C, para poder acometer las pruebas experimentales pertinentes. Como plataforma de desarrollo del controlador se empleará Player. A través de Stage, se observará si los resultados del algoritmo de control diseñado concuerdan con los de MATLAB/Simulink previamente obtenidos.

Por último, se realizarán las pruebas experimentales. Determinando a través de la mismas, el correcto diseño del sistema [CACC](#). A partir de los resultados experimentales, se procederá a la obtención de las conclusiones y posibles líneas futuras de investigación.

Capítulo 3

Sistema CACC para 3 vehículos en convoy

3.1 Introducción

En el presente capítulo se lleva a cabo el diseño de un CACC para un convoy de tres vehículos. En el mismo, se partirá de un modelo de dinámica longitudinal de un vehículo y del sistema ACC.

El capítulo se estructura de la siguiente forma: Definición general del modelo de dinámica de un vehículo, estabilidad de cadena y estrategia de espaciamiento. Una vez definidos dichos conceptos generales, se procede a la descripción de la estructura de control. Se parte de un sistema ACC, y al mismo se le añade información adicional a través de una red inalámbrica para obtener el sistema CACC. Se comprueba el correcto funcionamiento del diseño en cada uno de los casos en los apartados correspondientes de validación mediante simulación. Dicha validación, no solo sirve para comprobar el correcto funcionamiento, sino que también se utilizará como medio de comparación del sistema ACC y CACC en términos de estabilidad de cadena, y del objetivo principal del trabajo: mejorar el problema de la congestión.

3.2 Modelo Dinámico Longitudinal del Vehículo

Para cada uno de los vehículos que forman la cadena emplearemos el modelo linealizado de tercer orden en *Variables de Estado (VVEE)* usado en [Liu et al., 2001] [Ploeg et al., 2011] [Naus et al., 2010a]. Eligiendo como variables de estado $x_i = [q_i \ v_i \ a_i]$ la evolución de cada una de las variables para un vehículo i en la cadena se describe en la ecuación 3.1.

$$\begin{aligned}\dot{q}_i(t) &= v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) &= a_i(t) \\ \dot{a}_i(t) &= -\eta^{-1}a_i(t) + k_{g,i}\eta^{-1}\tilde{u}_i(t)\end{aligned}\tag{3.1}$$

Donde $q_i(t)$, $v_i(t)$, $a_i(t)$ son posición absoluta, velocidad y aceleración respectivamente; η_i representa las características dinámicas del actuador interno; \tilde{u}_i es la aceleración comandada para el vehículo i ; y $k_{g,i}$ es la ganancia del modelo, idealmente igual a la unidad.

Además en el presente modelo dinámico se tiene en cuenta un retardo constante ($\tau_{a,i}$) entre la aceleración deseada (u_i) y la comandada (\tilde{u}_i), para considerar retardos en la actuación del acelerador del vehículo. De esa forma la aceleración comandada responde a la ecuación 3.2.

$$\tilde{u}_i(t) = u_i(t)(t - \tau_{a,i}) \quad (3.2)$$

Equivalentemente, usando transformadas de Laplace el modelo de vehículo puede ser representado por la función de transferencia de la ecuación 3.3.

$$G_i(s) = \frac{Q_i(s)}{U_i(s)} = \frac{k_{g,i}}{s^2(\eta_i s + 1)} e^{-\tau_{a,i}s} \quad (3.3)$$

3.3 Estabilidad de Cadena

De todas las posibilidades existentes para el estudio de la estabilidad de cadena, nos centramos en aquella que se analiza a través de resultados de posición, velocidad y aceleración de cada uno de los vehículos a lo largo de la cadena. Concretamente, se observa si dichas curvas se amplifican a lo largo que avanza el índice dentro de la cadena de vehículos. A modo de ejemplo de como analizar la estabilidad de cadena a través de resultados de velocidad, en las Figura 3.1 se muestra un caso estable y un caso inestable para una cadena formada por 3 vehículos.

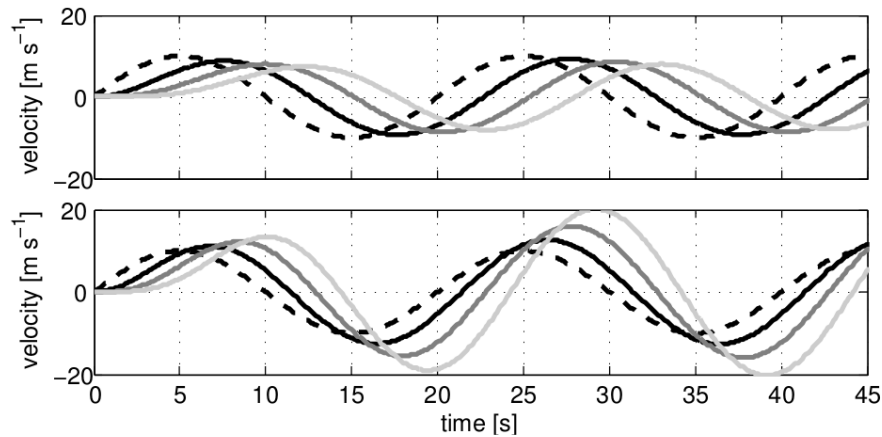


Figura 3.1: Resultados para un cadena de 3 vehículos. La línea punteada representa el perfil de velocidad de un vehículo de referencia. Y las líneas continuas representan 3 vehículos, cuya posición en la cadena va de más oscuro a más claro. Imagen tomada de [Naus et al., 2010a]

La estabilidad de cadena no se estudia sólo en el dominio temporal; también es necesario su estudio en el dominio frecuencial. Así, la estabilidad de cadena matemáticamente es representada a través de la función de transferencia mostrada en 3.4 [Swaroop, 1997].

$$SS_{\Delta_i}(s) = \frac{\Delta_i(s)}{\Delta_{i-1}(s)}, \quad i \geq 1, \quad s \in \mathbb{C} \quad (3.4)$$

Donde $\Delta_i(s) = \mathcal{L}\{\delta_i\}$, siendo $\delta_i \in \mathbb{R}$ la señal de interés para el estudio de la estabilidad de cadena. La condición de estabilidad puede ser interpretada como la máxima amplificación de las perturbaciones a lo largo de la cadena. Esa amplificación máxima puede ser representada por la norma infinita de la función de transferencia de la estabilidad de cadena:

$$\|SS_{\Delta_i}(j\omega)\|_{\infty} = \sup_{\omega \in \mathbb{R}} \|SS_{\Delta_i}(j\omega)\| \quad (3.5)$$

Así, deacuerdo a [Liu et al., 2001] y [Naus et al., 2010a], formulamos la siguiente condición de estabilidad a través de la norma:

$$\|SS_{\Delta_i}(j\omega)\|_{\infty} \leq 1 \quad \forall \omega, \quad i \geq 1 \quad (3.6)$$

Por último, mencionar que a lo largo del presente capítulo se hará uso de la formulación frecuencial de la estabilidad de cadena para análisis de sistemas ACC y CACC matemáticamente. Concretamente como señal de análisis se considerará la posición.

3.4 Estrategia de Espaciamiento

Ya es conocido que existen dos estrategias diferentes de espaciamiento de vehículos en convoy: Distancia entre vehículos constante o “head time” constante.

El caso que nos ocupa es el de “head time” constante: Los vehículos que forman la cadena se encuentran interconectados con el objetivo de seguir al vehículo predecesor mientras mantienen una determinada distancia que puede variar. La variación va a depender del valor constante establecido para el “head time” y de la velocidad. Así la distancia deseada ($x_{r,d,i}$) entre la parte frontal del vehículo i con la parte trasera de su predecesor viene dada por:

$$x_{r,d,i}(t) = x_{r,0,i} + h_{d,i}\dot{x}_i(t) \quad (3.7)$$

donde $x_{r,0,i}$ es la distancia constante que hay entre vehículos cuando estos están parados; $h_{d,i}$ es el “head time”, representando el tiempo que necesitaría el vehículo i para alcanzar la posición del vehículo $i-1$ a velocidad \dot{x}_i cuando $x_{r,0,i} = 0$. Notar que la distancia actual entre dos vehículos es fácil de obtener a partir de las posiciones absolutas de cada uno de ellos (x_i), como se observa en la ecuación 3.8.

$$x_{r,i}(t) = x_{i-1}(t) - x_i(t) \quad (3.8)$$

Así, el objetivo local de control, referido como política de espaciamiento, trata de regular el error de 3.9 a cero.

$$e_i(t) = x_{r,i}(t) - x_{r,d,i}(t) \quad (3.9)$$

3.5 ACC

Volvemos a considerar la cadena formada por 3 vehículos distintos de la Figura 2.4, donde $x_{r,i}$, $\dot{x}_{r,i}$, \ddot{x}_i , y l_i son posición relativa, velocidad relativa, aceleración y la longitud del vehículo i , respectivamente. Recordamos que el objetivo de la estrategia de espaciamiento es seguir al vehículo predecesor a la posición relativa deseada expresada por 3.7.

Usando radar o láser en cada uno de los vehículos es sencillo obtener la posición relativa $x_{r,i}$, sin tener en cuenta la longitud del vehículo. Dicha información servirá como realimentación de nuestro sistema de

control ACC. Así, el objetivo es controlar el error de espaciamiento de la ecuación 3.9. La propia definición de $e_i(t)$ implica una acción positiva de control, por ejemplo, se requiere aceleración cuando la posición entre vehículos $x_{r,i}$ es muy grande respecto a la deseada $x_{r,d,i}$. Dicha acción de control, aceleración, es definida como $u_i(t)$. El control resultante se muestra en la Figura 3.2. Para un mejor análisis, la salida del sensor está basada en las posiciones absolutas del vehículo i y $i - 1$. Los modelo $G_i(s)$ y $K_i(s)$ representan funciones de transferencia lineales.

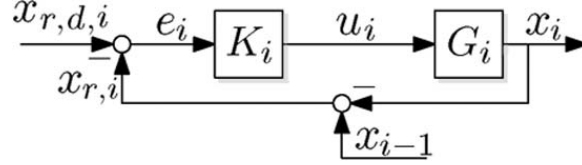


Figura 3.2: Estructura de control sistema ACC. Imagen tomada de [Naus et al., 2010c].

$G_i(s)$ ya es conocido como el modelo de dinámica longitudinal del vehículo i expresado a través de 3.3. Este modelo ya incluye un lazo de control interno, que se encarga de alcanzar la aceleración deseada mediante la actuación de freno y acelerador.

$K_i(s)$ es un controlador PD clásico que actúa sobre la información sensada para poder seguir al vehículo predecesor, la función de transferencia del mismo se muestra a continuación:

$$U_i(s) = K_i(s)E_i(s) = \omega_{c,i}(\omega_{c,i} + s)E_i(s) \quad (3.10)$$

Donde $\omega_{c,i}$ es el ancho de banda del controlador expresado como $\omega_{c,i} \ll \omega_{g,i} = (1/\eta_i)/20$, siendo $\omega_{g,i}$ el ancho de banda de la función de transferencia de lazo cerrado que se muestra en 3.11. Así, se previene la saturación del controlador y se asegura el confort del pasajero [Ploeg et al., 2011].

$$T_i(s) = \frac{G_i(s)K_i(s)}{1 + G_i(s)K_i(s)} \quad (3.11)$$

Si recurrimos a la expresión temporal de dicho controlador 3.12, se observa como el controlador emplea tanto posición relativa como velocidad relativa obtenida a través del radar o láser, así como medidas de velocidad y aceleración del propio vehículo i .

$$u_i(t) = \omega_{c,i}^2 e_i(t) + \omega_{c,i} \dot{e}_i(t) = \omega_{c,i}^2 e_i(t) + \omega_{c,i} (\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i - h_{d,i} \ddot{x}_i) \quad (3.12)$$

Ahora bien, en la Figura 3.2 aparece la posición relativa deseada $x_{r,d,i}$ que también es necesario calcular según la política de espaciamiento elegida. Así, si se considera que la distancia deseada en parada $x_{r,0,i}$ como una extensión del propio vehículo $l'_i = l_i + x_{r,0,i}$ (ver Figura 3.3), la distancia relativa deseada 3.7 resulta 3.13. Reestructurando la estructura de control como se muestra en la Figura 3.4.

$$x_{r,d,i}(t) = h_{d,i} \dot{x}_i(t) \quad (3.13)$$

Si consideramos esa adición de la política de espaciamiento, la función de transferencia en lazo cerrado 3.11 también varía:

$$T_i(s) = \frac{G_i(s)K_i(s)}{1 + H_i(s)G_i(s)K_i(s)} \quad (3.14)$$

Donde:

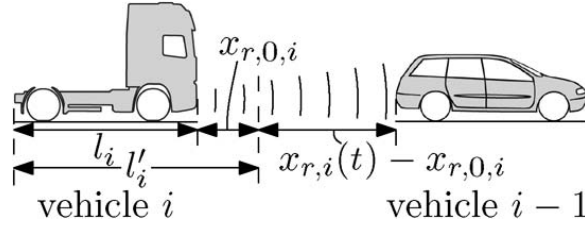


Figura 3.3: Dos vehículos en cadena. Consideración de la extensión de la longitud del vehículo como $l'_i = l_i + x_{r,0,i}$. Imagen tomada de [Naus et al., 2010c].

$$H_i(s) = 1 + h_{d,i}(s) \quad (3.15)$$

Esta función de transferencia en lazo cerrado servirá como base para estudio de la estabilidad de cadena del sistema ACC. En la misma los únicos parámetros variables son $h_{d,i}$ y $\omega_{c,i}$, y por ello la estabilidad dependerá del valor de los mismos.

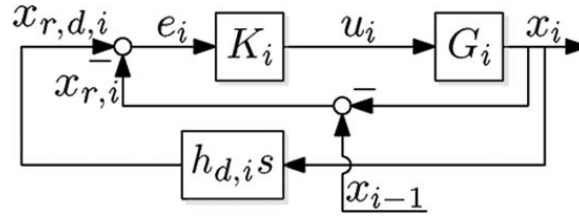


Figura 3.4: Estructura sistema ACC con política de espaciamiento. Imagen tomada de [Naus et al., 2010c].

Para observar la dependencia de la estabilidad según el valor de dichos parámetros, recurrimos a la expresión en frecuencia de la estabilidad de cadena 3.4, concretamente será estudiada a través de las señales de posición absoluta X_i . Así, según [Naus et al., 2010a] la función de transferencia queda:

$$\frac{X_i}{X_0} = \begin{cases} G_1 K_1 S_1 & \text{si } i = 1 \\ \frac{X_1}{X_0} \prod_{k=2}^i S_k K_k G_k & \text{si } i > 1 \end{cases} \quad (3.16)$$

Donde:

$$S_i = (1 + H_i G_i K_i)^{-1} \quad (3.17)$$

En este caso, la posición absoluta del vehículo cero X_0 hace referencia a un perfil de posición a seguir por el primer vehículo de la cadena. El estudio de la estabilidad tendrá sentido a partir del segundo vehículo, esto es, estabilidad de 2 a 1 o de 3 a 2. Recordamos que el control diseñado sólo tiene en cuenta las acciones del vehículo predecesor. De esta forma, la estabilidad de cadena en 3.4 se completa en 3.18, teniendo en cuenta 3.16.

$$SS_i = \frac{X_i}{X_{i-1}} = \frac{X_i}{X_0} \left(\frac{X_{i-1}}{X_0} \right)^{-1}, \quad i > 1 \quad (3.18)$$

Sustituyendo:

$$SS_i = \frac{G_i K_i}{1 + H_i G_i K_i}, \quad i > 1 \quad (3.19)$$

Que coincide con la función de transferencia en lazo cerrado del sistema, $T_i(s)$ expresada en 3.14.

Por otra parte, dicha función debe cumplir la condición de estabilidad de norma infinita 3.6, para ello únicamente debe cumplirse:

$$|SS_i(j\omega)| \leq 1, \quad i > 1, \quad \forall \omega \quad (3.20)$$

Para el cálculo de los valores de $h_{d,i}$ y $\omega_{c,i}$ que cumplan la condición de estabilidad 3.20, se procede a simplificar el modelo del vehículo a $G_i = s^{-2}$, de forma que el cálculo resulte más sencillo. Así, sustituyendo 3.10 y 3.15 en 3.20, para asegurar estabilidad de cadena se debe cumplir:

$$\frac{\omega_{c,i}^2(2 - \omega_{c,i}^2 h_{d,i}^2)}{(1 + \omega_{c,i} h_{d,i})^2} \leq \omega^2 \quad i > 1, \quad \forall \omega \quad (3.21)$$

Considerando únicamente valores de frecuencia $\omega \in \mathbb{R}$ implica que $\min \omega^2 = 0$. De esta forma, el cálculo del mínimo “head time” que haga al sistema se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{\omega_{c,i}^2(2 - \omega_{c,i}^2 h_{d,i}^2)}{(1 + \omega_{c,i} h_{d,i})^2} \leq 0 \quad i > 1, \quad \forall \omega \quad (3.22)$$

De 3.22 se llega a que la estabilidad de cadena se asegura cuando $h_{d,i} \geq h_{d,i,min} = \sqrt{2}\omega_{c,i}^{-1}$ para $i > 1$.

Notar que para la mejora del problema de la congestión nos interesa el menor “head time” posible que haga al sistema estable.

3.6 Validación Sistema ACC

En el presente apartado, se emplea la herramienta de simulación Simulink de MATLAB para comprobar que los fundamentos teóricos descritos en el apartado anterior se cumplen. Particularmente, se atiende al análisis de estabilidad de cadena haciendo uso de distintos modelos de vehículos, simulando situaciones de tráfico homogéneo y heterogéneo.

En primer lugar, se realiza en Simulink una cadena de 3 vehículos cuyo modelo en VVEE es 3.23. Dicho modelo es una simplificación del modelo de dinámica longitudinal del apartado 3.2 (sería el mismo, sólo que con los parámetros de la tabla 3.1). Los tres vehículos que forman la cadena son iguales, por tanto estamos ante una situación de tráfico homogéneo. A su vez, cada uno de estos vehículos está equipado con un sistema ACC. Dicho sistema se muestra en la Figura 3.5. Fijémonos como cada vehículo tiene en cuenta su posición y la del vehículo anterior para el cálculo del error en la estrategia de espaciamiento. Dicho error va al controlador PD, obteniendo como acción de control la aceleración necesaria.

El primer vehículo de la cadena tiene como posición de referencia la de un vehículo 0. El perfil del vehículo de referencia se obtiene a partir de un perfil de velocidad. Dicho perfil de velocidad consiste en la siguiente serie de cambios. En el primer ciclo, el vehículo va a 25.5 m/s durante 10 s; después, acelera a una aceleración constante de $1/80g$ para alcanzar una velocidad de 29.5 m/s. La velocidad se mantiene constante durante 10 s, antes de que el vehículo comience a decelerar a $1/80g$ para volver a una velocidad constante de 25.5 m/s durante otros 10 s. El segundo ciclo repite la misma curva de aceleración y deceleración, sólo que con una magnitud de $1/40g$ y 15 s de velocidad constante. Por último, el tercer y cuarto ciclo repiten otra vez el mismo patrón a $1/20g$ con 20 s de velocidad constante.

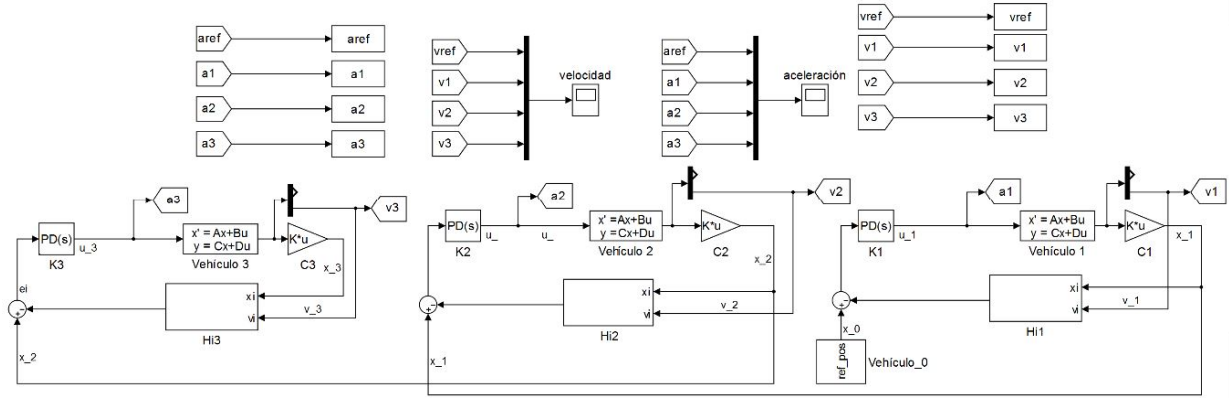


Figura 3.5: Cadena de 3 vehículos equipado con sistema ACC. Modelo de vehículo 1/ s^2 .

Tabla 3.1: Parámetros cadena de vehículos. Caso modelo 1/ s^2 . Tráfico Homogéneo.

Vehículo i	$K_{g,i}$	η_i	τ_i	$\omega_{c,i}$	$h_{d,i}$
1	1	0	0	0.5	3
2	1	0	0	0.5	3
3	1	0	0	0.5	3

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{v}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ v_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} a_i \quad (3.23)$$

$$x_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ v_i \end{bmatrix}$$

Volviendo a referenciar la tabla 3.1, en la misma, el ancho de banda del controlador es calculado a través de la condición de no saturación y comodidad para el pasajero $\omega_{c,i} = (1/\eta_i)/20 = 0,5 \text{ rad/s}$. En función del $\omega_{c,i}$ obtenido se procede a calcular el valor mínimo de “head time” que hace al sistema estable en 3.24, de ahí que el $h_{d,i}$ elegido para cada uno de los vehículos sea de 3 s. Para ese valor de “head time” se comprueba que el sistema es estable a través de las curvas de velocidad y aceleración de las figuras 3.6 y 3.7. Ahora bien, habrá que analizar si el valor de $h_{d,i,min}$ proporcionado por este caso simplificado se cumple también con el modelo de dinámica longitudinal del apartado 3.2.

$$h_{d,i,min} = \sqrt{2}\omega_{c,i}^{-1} = \sqrt{2}(0,5)^{-1} = 2,828s \quad (3.24)$$

En la figura 3.8 se muestra el modelo en Simulink de tres vehículos equipados con sistema ACC. El modelo en VVEE de cada uno de ellos se basa en el modelo de dinámica longitudinal de la expresión 3.25. Notar como en este caso la acción de control de aceleración presenta un determinado retardo, a diferencia del caso anterior.

Tabla 3.2: Parámetros cadena de vehículos. Caso modelo real. Tráfico homogéneo.

Vehículo i	$K_{g,i}$	η_i	τ_i	$\omega_{c,i}$	$h_{d,i}$
1	1	0.1	0.1	0.5	3
2	1	0.1	0.1	0.5	3
3	1	0.1	0.1	0.5	3

Tabla 3.3: Parámetros cadena de vehículos. Caso modelo real. Tráfico heterogéneo.

Vehículo i	$K_{g,i}$	η_i	τ_i	$\omega_{c,i}$	$h_{d,i}$
1	0.7	0.1	0	0.5	3
2	1	0.5	0.1	0.1	3
3	1.3	0.4	0.3	0.125	3

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{v}_i \\ \dot{a}_i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\eta_i^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ v_i \\ a_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_{g,i}\eta_i^{-1} \end{bmatrix} \tilde{u}_i \\
 x_i &= [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x_i \\ v_i \\ a_i \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Para el estudio de la estabilidad, se tiene en cuenta una cadena de 3 vehículos iguales, cuyos parámetros se muestran en la tabla 3.2. El valor de $h_{d,i,min}$ sigue siendo el calculado en base al modelo simplificado del vehículo. Para un $h_{d,i} = 3s$ se muestra en las figuras 3.9 y 3.10 que el sistema aún con un modelo más fiel a la realidad que incluye retardos, sigue siendo estable.

Ahora bien, es necesario analizar también la situación en la que la cadena de vehículos está formada por vehículos de distintas características. La situación de tráfico heterogéneo se realiza sobre el mismo modelo, sólo que variando los parámetros de la forma en la que se muestra en la tabla 3.3. En dicha tabla se ve cómo en este caso el cálculo del ancho de banda del controlador PD varía según el valor de η_i para poder asegurar el confort de los pasajeros y evitar saturación del controlador. Esto conlleva a una situación de compromiso, ya que un ancho de banda inferior hace que el $h_{d,i,min}$ sea superior, empeorando por tanto el problema de la congestión, pero coger el mayor ancho de banda de los resultantes para todos conlleva a comprometer el confort de los pasajeros. Cómo el presente apartado sólo pretende analizar si el sistema sigue siendo estable, optamos por elegir el $w_{c,i}$ más grande, para todos los controladores, manteniendo el valor de $h_{d,i}$ de forma que los resultados sean comparables. En las figuras 3.11 y 3.12 se observa como el sistema sigue siendo estable. La única diferencia apreciable es un pequeño sobreimpulso en la respuesta.

Por último, en las figuras 3.13 y 3.14 se observa una situación de tráfico heterogéneo con inestabilidad de cadena, ya que $h_{d,i} = 2s$, incumpliendo por tanto el $h_{d,i,min} = 2,828s$.

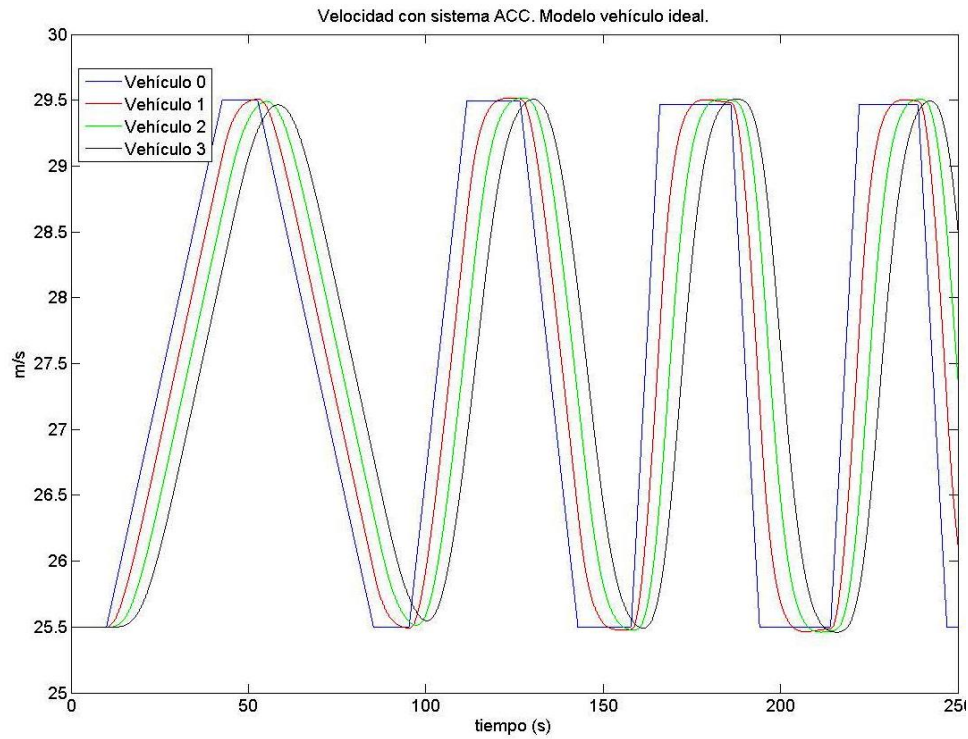


Figura 3.6: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos iguales con modelo $1/s^2$ equipados con sistema ACC siguiendo un vehículo de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$.

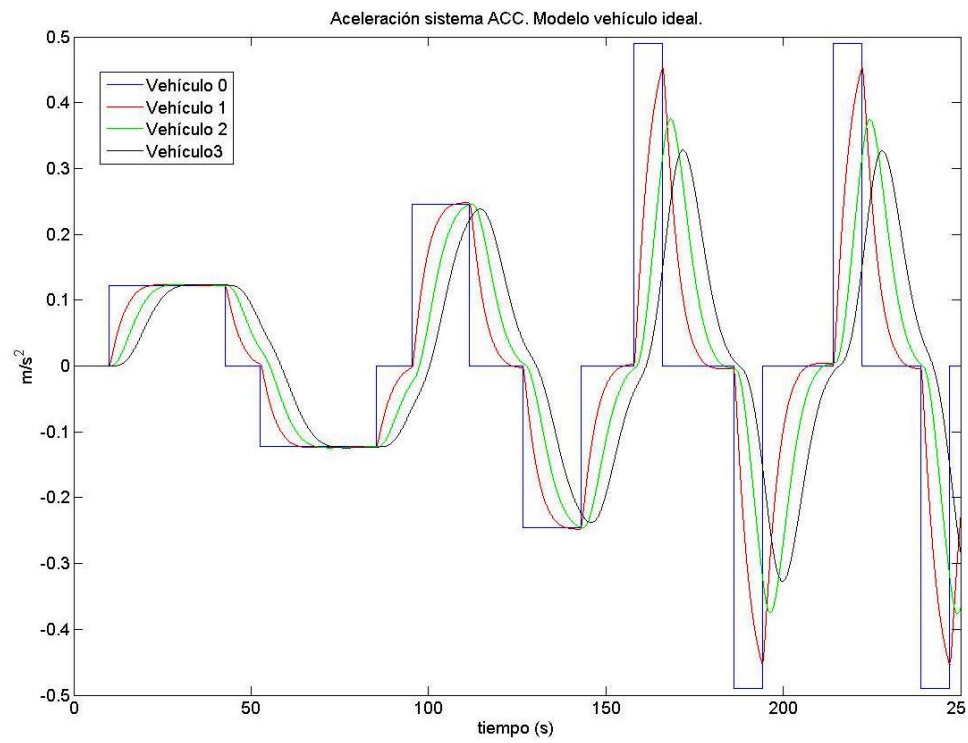


Figura 3.7: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres vehículos iguales con modelo $1/s^2$ equipados con sistema ACC siguiendo un vehículo de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$.

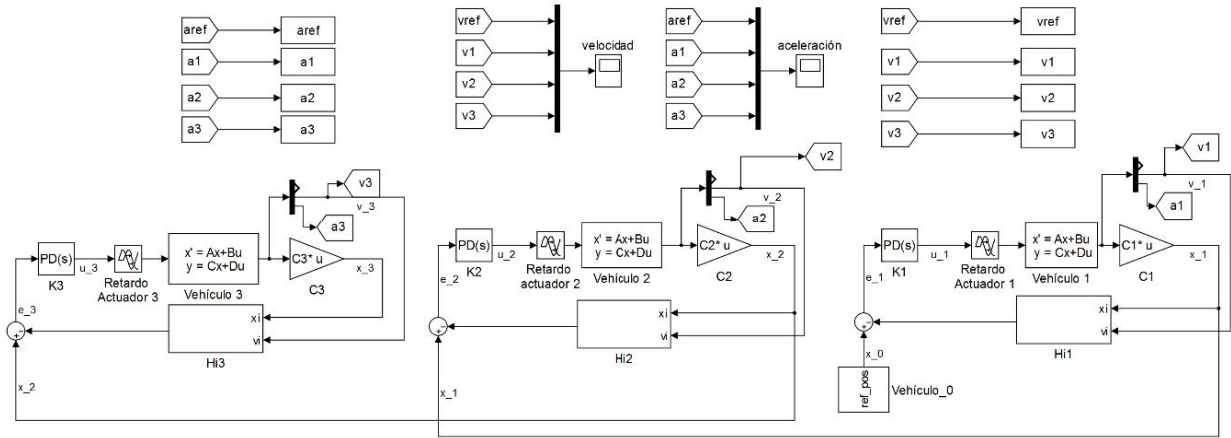


Figura 3.8: Cadena de 3 vehículos equipados con sistema ACC. Modelo de vehículo real.

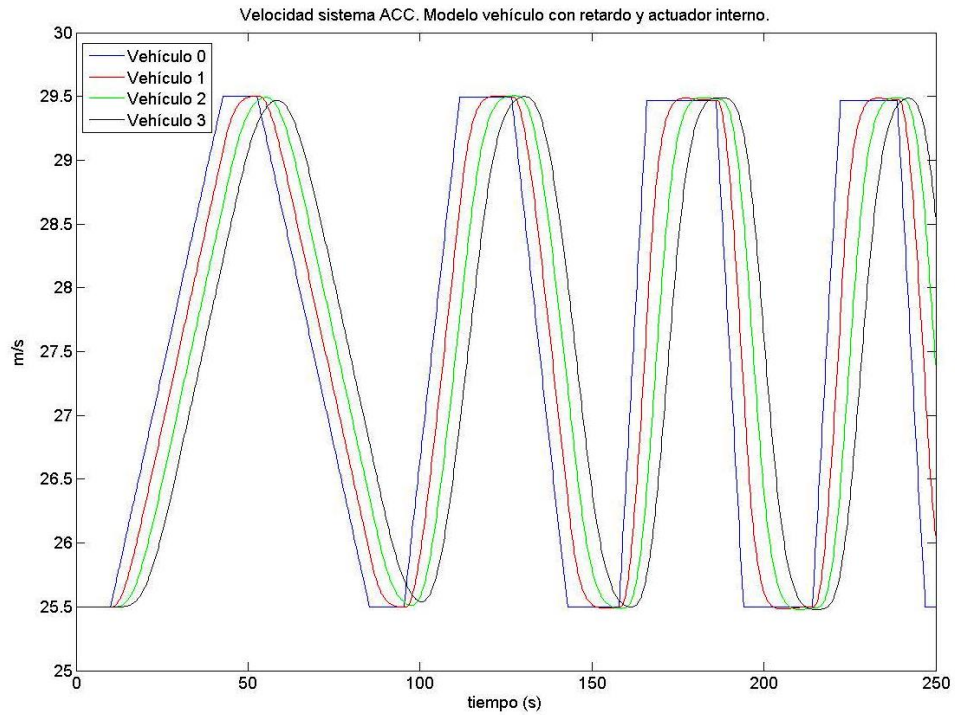


Figura 3.9: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos iguales con modelo real equipados con sistema ACC siguiendo un vehículo de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$.

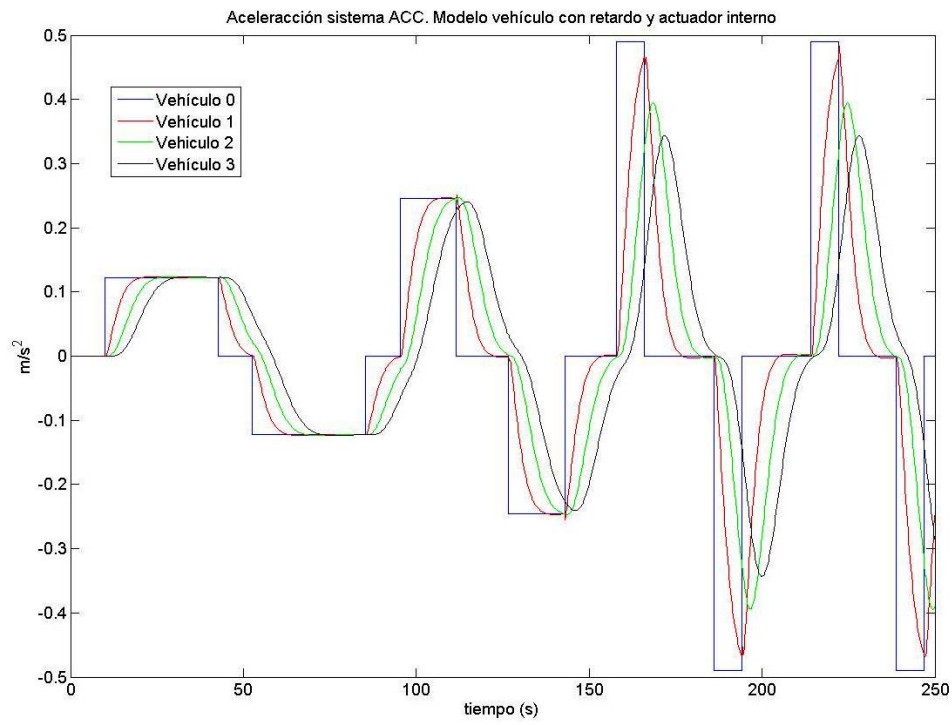


Figura 3.10: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres vehículos iguales con modelo real equipados con sistema ACC siguiendo un vehículo de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$.

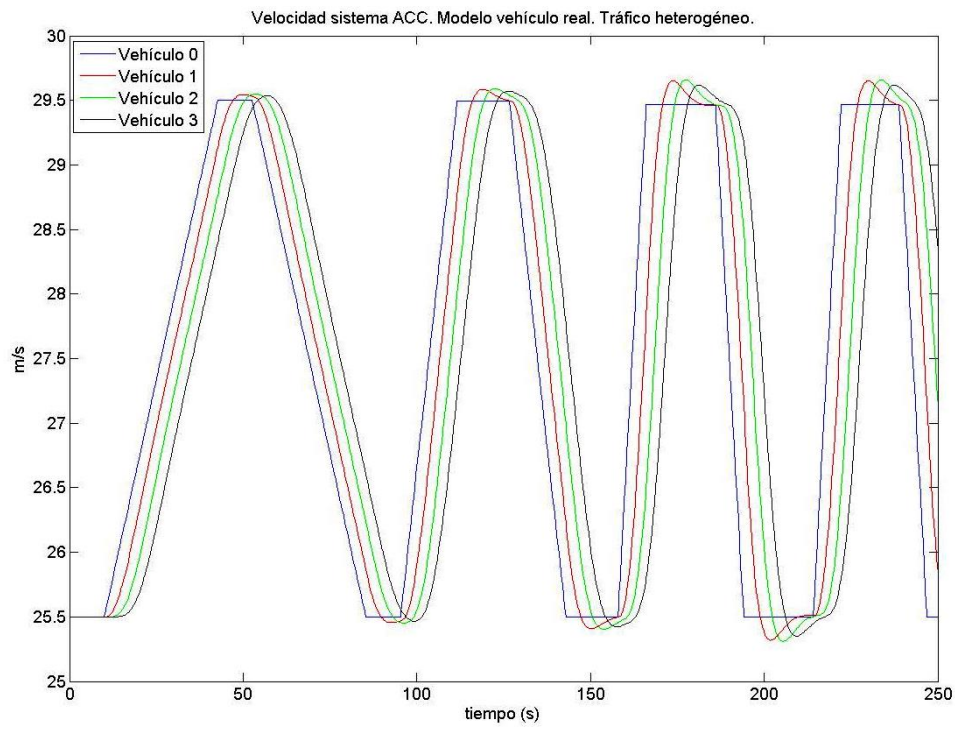


Figura 3.11: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos distintos con modelo real equipados con sistema ACC siguiendo un vehículo de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$.

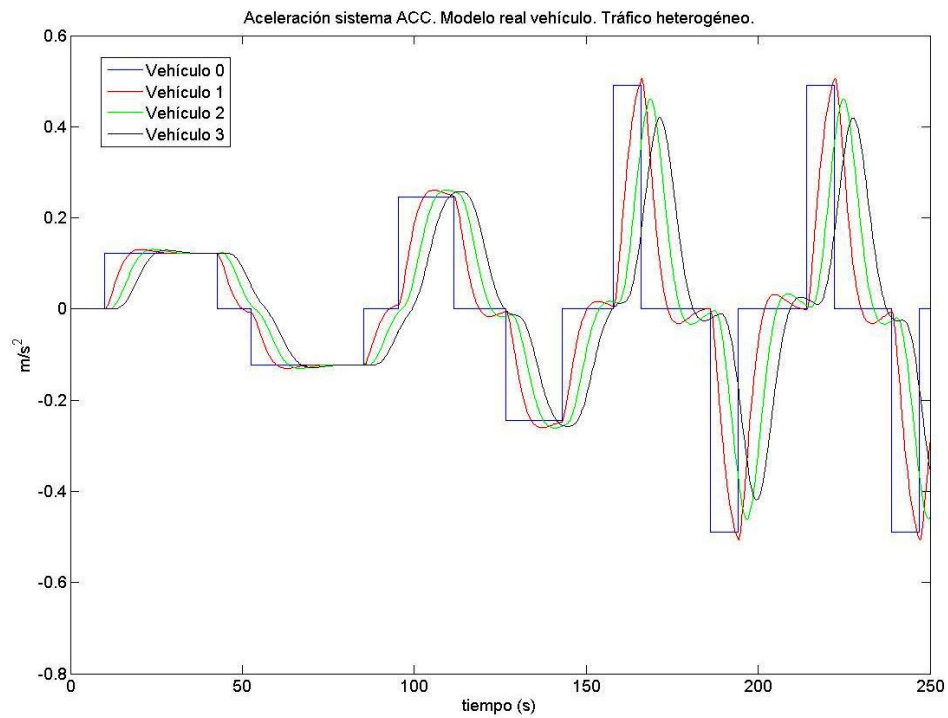


Figura 3.12: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres vehículos distintos con modelo real equipados con sistema ACC siguiendo un vehículo de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$.

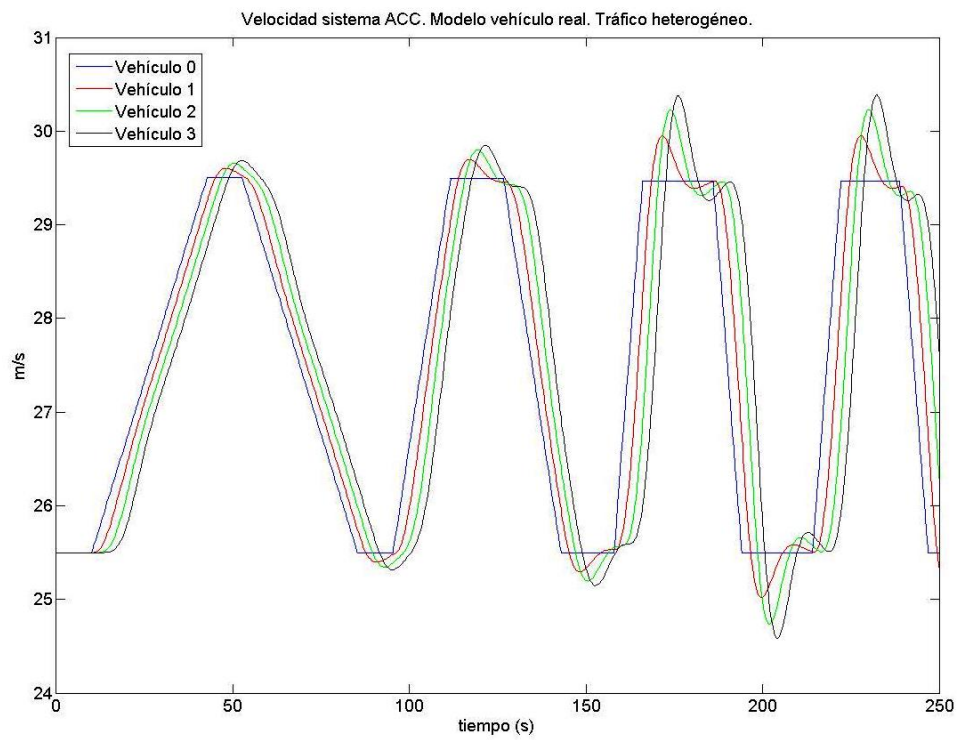


Figura 3.13: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos distintos con modelo real equipados con sistema ACC siguiendo un vehículo de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 2s$.

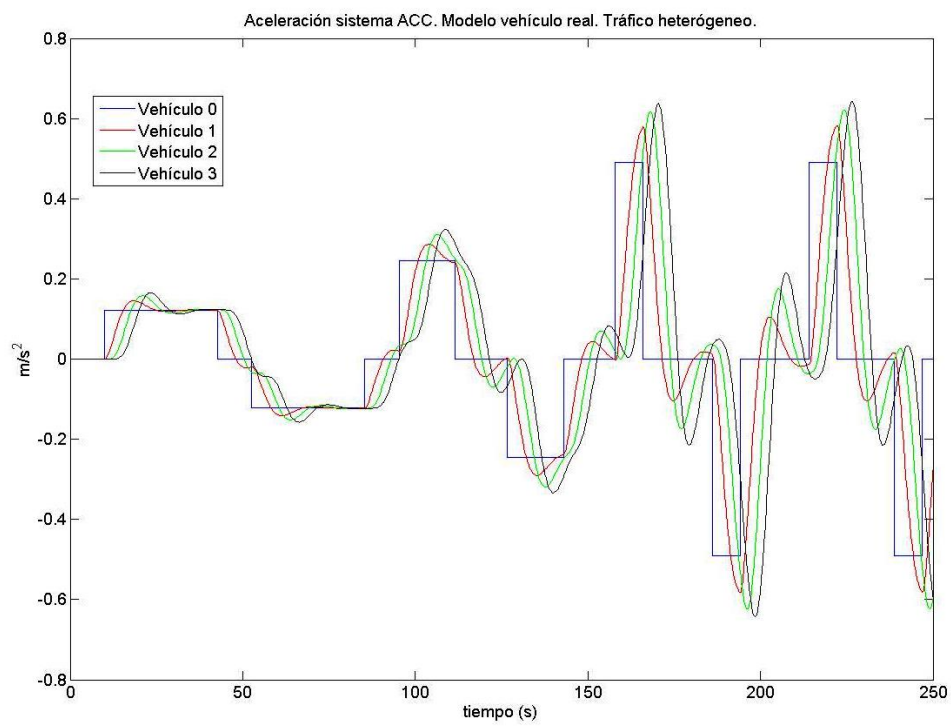


Figura 3.14: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres vehículos distintos con modelo real equipados con sistema ACC siguiendo un vehículo de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 2s$.

3.7 CACC

Como ha sido discutido en el estado del arte del presente trabajo, se considera como sistema **CACC** a aquél sistema que tiene comunicación inalámbrica con su vehículo predecesor. A través de este canal de comunicación estará disponible la aceleración del vehículo predecesor \ddot{x}_{i-1} (ver 2.4). Los datos comunicados a través de la red inalámbrica se emplean en un entorno “feedforward”, extendiendo de esta forma la funcionalidad **ACC** a **CACC**.

La aceleración del vehículo predecesor se usa como control “feedforward” a través de un filtro $F_i(s)$. La aceleración es obtenida a través de una red inalámbrica, por lo que es importante considerar un retardo $D_i(s)$ en la misma. La estructura de control resultante es la que se muestra en la figura 3.15.

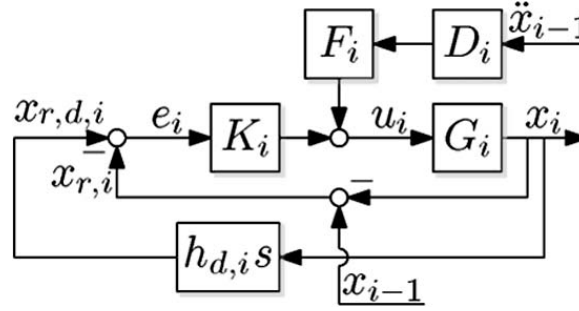


Figura 3.15: Estructura de control CACC. Imagen tomada de [Naus et al., 2010c].

El retardo de la comunicación se considera una constante θ_i , resultando:

$$\mathcal{L}\{\ddot{x}_{i-1}(t - \theta_i)\} = D_i(s)s^2 X_{i-1}(s) \quad (3.26)$$

Donde:

$$D_i(s) = e^{-\theta_i(s)}, \quad i > 1 \quad (3.27)$$

El diseño de $F_i(s)$ se basa en obtener un error en estado estacionario nulo. Según [Naus et al., 2010a] la transformada de laplace de dicho error es:

$$E_i(s) = \frac{1 - H_i(s)G_i(s)F_i(s)D_i(s)s^2}{1 + H_i(s)G_i(s)K_i(s)} X_{i-1}(s), \quad i > 1 \quad (3.28)$$

Notar como para que el error sea nulo, es necesario tener un estimador para compensar el retardo de la señal de aceleración que nos llegue. En este trabajo, se trabaja con dicho retardo, analizando el efecto del mismo a la estabilidad del sistema. Así, teniendo en cuenta que el retardo no es compensado por $F_i(s)$ y con el objetivo de que $\mathcal{L}\{e_i(s)\} = 0$ el filtro “feedforward” $F_i(s)$ resulta:

$$F_i(s) = \frac{1}{H_i(s)G_i(s)s^2}, \quad i > 1 \quad (3.29)$$

Ahora bien, el análisis de la estabilidad varía; volvemos a recurrir a la expresión en frecuencia de la estabilidad de cadena 3.4. Modificando 3.16 como sigue:

$$\frac{X_i}{X_0} = \begin{cases} G_1 K_1 S_1 & \text{si } i = 1 \\ \frac{X_1}{X_0} \prod_{k=2}^i S_k (F_k D_k s^2 + K_k) G_k & \text{si } i > 1 \end{cases} \quad (3.30)$$

Donde:

$$S_i = (1 + H_i G_i K_i)^{-1} \quad (3.31)$$

Recordando que el control diseñado sólo tiene en cuenta las acciones del vehículo predecesor. La función de transferencia de la estabilidad de cadena, teniendo en cuenta 3.30 queda:

$$SS_i = \frac{G_i F_i D_i s^2 + G_i K_i}{1 + H_i G_i K_i}, \quad i > 1 \quad (3.32)$$

Para el caso del sistema CACC la idea de estabilidad de cadena se mantiene, y por tanto la condición que a de cumplir: ver 3.20.

Tomando $F_i(s)$ como está definido en 3.29 y sustituyéndolo en la función de transferencia de estabilidad de cadena 3.32:

$$SS_i = \frac{D_i + H_i G_i K_i}{H_i (1 + H_i G_i K_i)}, \quad i > 1 \quad (3.33)$$

Sin tener en cuenta retardo en la comunicación, $D_i = 1$, la ecuación 3.33 se modifica:

$$SS_i = \frac{1}{H_i}, \quad i > 1 \quad (3.34)$$

Consecuentemente, en el caso de que el retardo de red inalámbrica sea nulo, la estabilidad de cadena es garantizada para cualquier $h_{d,i} > 0$.

Ahora bien, dicha situación de retardo nulo es ideal. Si se considera un retardo de comunicación $\theta_i > 0s$, el cálculo matemático del “head time” mínimo $h_{d,i,min}$ se vuelve demasiado complejo, no proporcionando información relevante. Por ello, se recurre a técnicas de aproximación numérica como se apunta en [Naus et al., 2010a]. En la figura 3.16 se muestra el resultado dependiente tanto del retardo de la red inalámbrica θ_i como del ancho de banda del controlador PD $\omega_{c,i}$. Notar como en la aproximación numérica, mientras mayor sea el retardo o menor sea el ancho de banda del controlador, el $h_{d,i,min}$ necesario será mayor. Este resultado corresponde a considerar un modelo de vehículo simplificado como $1/s^2$.

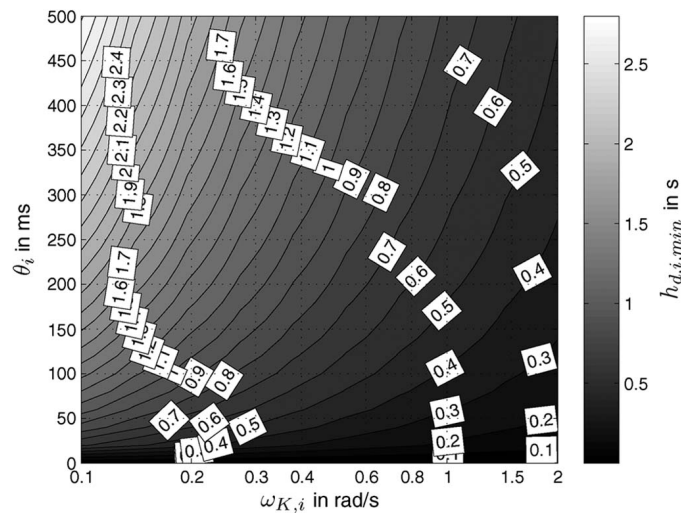


Figura 3.16: Gráfico de contorno, indicando el $h_{d,i,min}$ para el que se asegura la estabilidad del sistema, en función de $\omega_{c,i}$ y θ_i . Imagen tomada de [Naus et al., 2010c].

Por último, comparando el resultado de la figura 3.16 para un sistema CACC con el valor de $h_{d,i,min}$ necesario para el sistema ACC, la ventaja es obvia, para un valor razonable de retardo en la comunicación, el valor mínimo de “head time” necesario para garantizar la estabilidad de cadena es significativamente menor, mejorando por tanto el problema de la congestión.

3.8 Validación Sistema CACC

En el presente apartado, de la misma forma que en el apartado 3.6 se comprueban los fundamentos teóricos descritos a través de la herramienta de simulación Simulink de MATLAB, solo que en este caso del sistema CACC. Las situaciones a simular serán similares: distintos modelos de vehículos, tráfico homogéneo y heterogéneo y retardos constantes en la red inalámbrica que añade esta tecnología.

En primer lugar, se vuelve a realizar en Simulink una cadena de 3 vehículos con el modelo simplificado descrito en 3.23. A su vez, cada uno de estos vehículos está equipado con un sistema ACC exactamente igual al del apartado 3.6. Ahora, la diferencia está en la adición de un control “feedforward”, al que le llega la aceleración del vehículo que le precede mediante una red inalámbrica que puede presentar un determinado retardo. En la figura 3.17 se muestra el modelo descrito. El perfil de posición del vehículo 0 o de referencia sigue siendo el mismo.

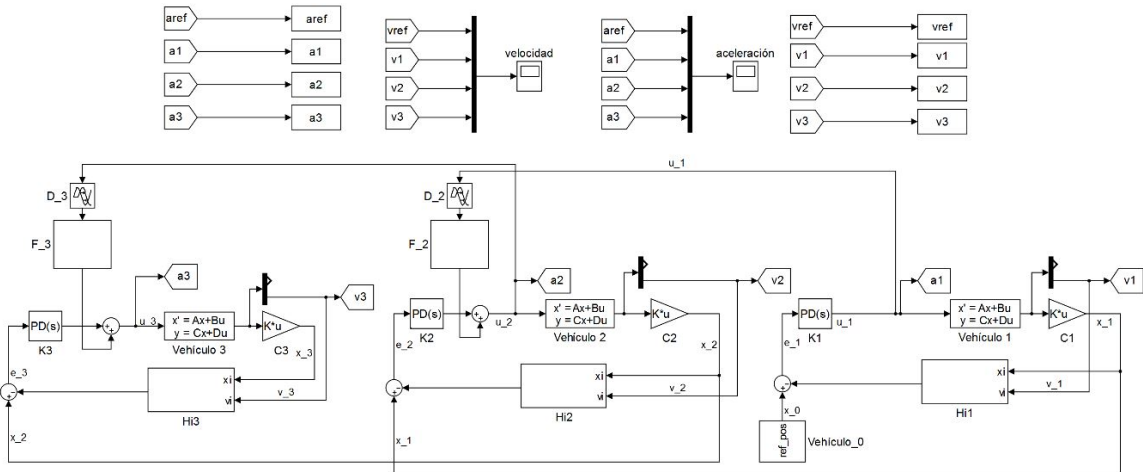


Figura 3.17: Cadena de 3 vehículos equipado con sistema CACC. Modelo de vehículo $1/s^2$.

La tabla 3.4 muestra los parámetros para la primera simulación. En la misma vemos que se trata de un caso de tráfico homogéneo, con modelo de vehículo simplificado a $1/s^2$ y sin retardo en la red inalámbrica. Bajo esta situación, la estabilidad de cadena se asegura siempre que $h_{d,i} > 0$, sea cual sea el ancho de banda del controlador $\omega_{c,i}$. En las figuras 3.19 y 3.20 se observa como las respuestas en velocidad y aceleración del sistema son estables para un $h_{d,i} = 0,1s$.

Ahora bien, pasamos al estudio del sistema anterior añadiéndole un determinado retardo en la comunicación. Ya es conocido que el hecho de tener un retardo en la comunicación establece un $h_{d,i,min}$ dependiente tanto del valor del propio retardo θ_i , como del ancho de banda del controlador PD $\omega_{c,i}$. La dependencia entre estas variables se muestran en el gráfico de la figura 3.16. Atendiendo a los parámetros de la tabla 3.5 y a dicho gráfico la estabilidad de cadena no está asegurada. Hecho demostrado a través de las figuras 3.21 y 3.22. Para que fuese estable se necesitaría un $h_{d,i} = 0,9s$ aproximadamente.

En la figura 3.18 se muestra el modelo en Simulink de tres vehículos equipados con sistema CACC. El modelo en VVEE de cada uno de ellos se basa en el modelo de dinámica longitudinal del apartado 3.2,

Tabla 3.4: Parámetros cadena de vehículos. Caso modelo ideal. Tráfico homogéneo. Sin retardo.

Vehículo i	$K_{g,i}$	η_i	τ_i	$\omega_{c,i}$	$h_{d,i}$	θ_i
1	1	0	0	0.5	0.1	-
2	1	0	0	0.5	0.1	0
3	1	0	0	0.5	0.1	0

Tabla 3.5: Parámetros cadena de vehículos. Caso modelo ideal. Tráfico homogéneo. Con retardo.

Vehículo i	$K_{g,i}$	η_i	τ_i	$\omega_{c,i}$	$h_{d,i}$	θ_i
1	1	0	0	0.5	0.1	-
2	1	0	0	0.5	0.1	0.2
3	1	0	0	0.5	0.1	0.2

siendo la expresión del mismo 3.25 (ya no empleamos el modelo $1/s^2$ para cada uno de los vehículos). Notar como en este caso la acción de control de aceleración presenta un determinado retardo, a diferencia del caso anterior.

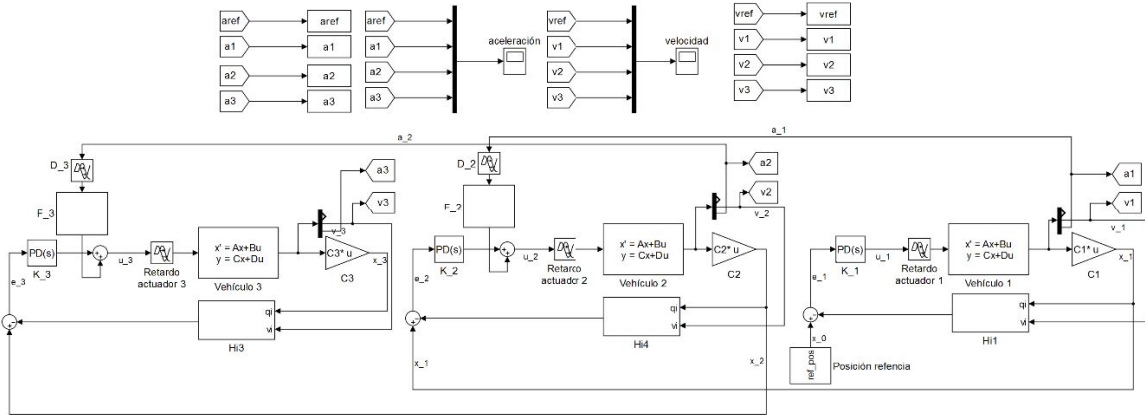


Figura 3.18: Cadena de 3 vehículos equipado con sistema CACC. Modelo de vehículo real.

El estudio de estabilidad con consideración de retardo en la comunicación inalámbrica se ha realizado mediante el modelo simplificado de vehículo $1/s^2$. A través del modelo más real expresado en 3.25 se pretende observar si sirven o no las mismas pautas para determinar el $h_{d,i,min}$ que hace estable al sistema.

En la tabla 3.6 se expresan los parámetros correspondientes a los resultados mostrados en las figuras 3.23 y 3.24. En ese caso, nos encontramos ante una situación de tráfico homogéneo con modelo de vehículo real, retardo en la comunicación $\theta_i = 200ms$ y ancho de banda del controlador $\omega_{c,i} = 0,5rad/s$. Con modelo ideal bastaría con un $h_{d,i} \geq 0,9s$, pero teniendo en consideración un modelo de vehículo con características dinámicas del actuador interno y retardo en la actuación de acelerador, ese “head time” no es suficiente. Distintas pruebas en simulación determinan que el “head time” necesario se aumenta en 0.6s, esto es, $h_{d,i} = 1,5s$. Con dicha política de espaciamiento, los resultados de las figuras 3.25 y 3.26 muestran que es estable.

Por último, se procede al estudio del caso de tráfico heterogéneo con modelo de vehículo real. Se parte de la adición de 0.6s al valor $h_{d,i,min}$ establecido a través de la figura 3.16. Además también se considera un ancho de banda general para los controladores $\omega_{c,i} = 0,5s$; considerándolo suficiente para evitar la

Tabla 3.6: Parámetros cadena de vehículos. Caso modelo real. Tráfico homogéneo. Con retardo.

Vehículo i	$K_{g,i}$	η_i	τ_i	$\omega_{c,i}$	$h_{d,i}$	θ_i
1	1	0.1	0.1	0.5	0.9	-
2	1	0.1	0.1	0.5	0.9	0.2
3	1	0.1	0.1	0.5	0.9	0.2

Tabla 3.7: Parámetros cadena de vehículos. Caso modelo real. Tráfico heterogéneo. Con retardo.

Vehículo i	$K_{g,i}$	η_i	τ_i	$\omega_{c,i}$	$h_{d,i}$	θ_i
1	0.7	0.1	0	0.5	1.5	-
2	1	0.5	0.1	0.5	1.5	0.2
3	1.3	0.4	0.3	0.5	1.5	0.2

saturación del actuador interno del vehículo, así como para asegurar el confort del conductor. Los valores de los parámetros para la simulación se muestran en la tabla 3.7. Las curvas de velocidad y aceleración de las figuras 3.27 y 3.28 demuestran que el $h_{d,i}$ adoptado en el caso de tráfico homogéneo, sirve también para el caso heterogéneo, ya que el sistema sigue manteniendo su estabilidad.

A través de todos los resultados obtenidos, es clara la ventaja que presenta el sistema CACC frente al ACC: asegura la estabilidad de cadena con valores más reducidos de "head time", que se traduce en una mejora directa del problema de la congestión. A modo de ejemplo, el último caso de simulación de tráfico heterogéneo presenta $h_{d,i,min}$ distintos según el sistema; para el ACC es 3s, mientras que para el sistema CACC es la mitad, 1.5s.

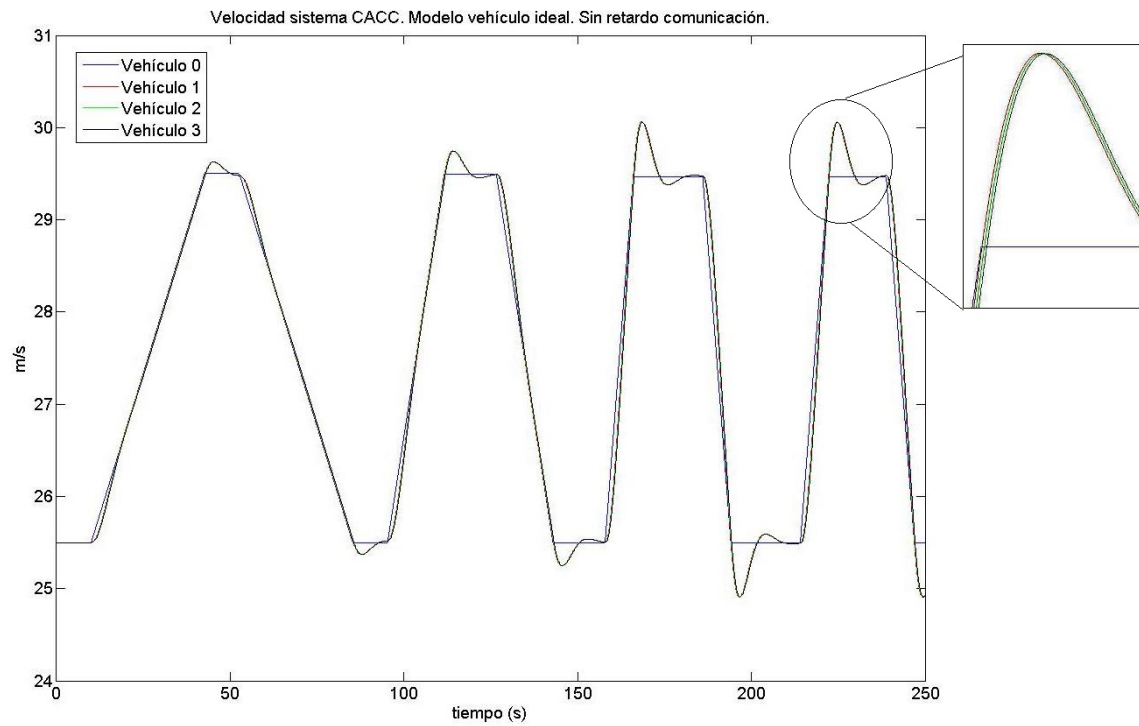


Figura 3.19: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos iguales con modelo $1/s^2$ equipados con sistema CACC sin retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 0,1s$.

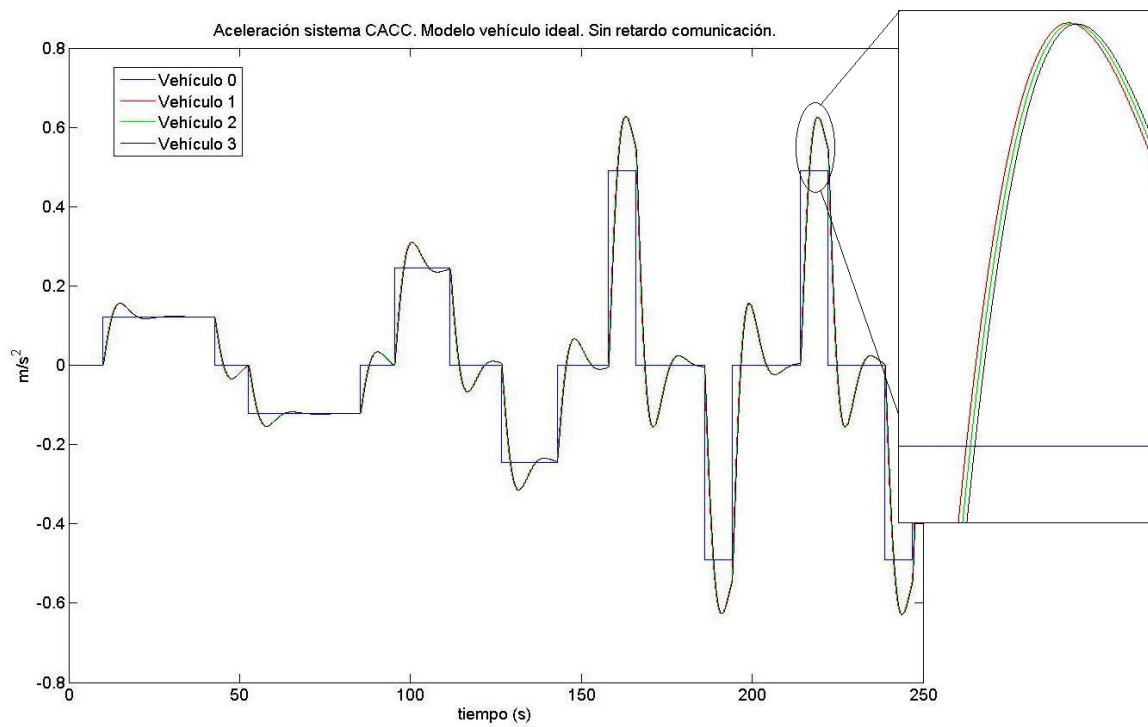


Figura 3.20: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres vehículos iguales con modelo $1/s^2$ equipados con sistema CACC sin retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 0,1s$.

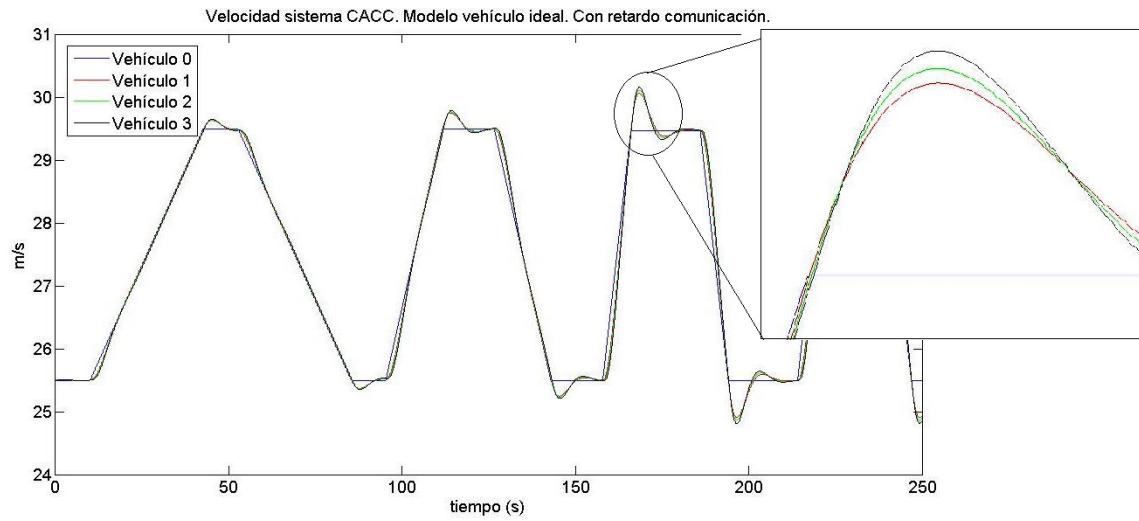


Figura 3.21: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos iguales con modelo $1/s^2$ equipados con sistema CACC con retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 0,1s$.

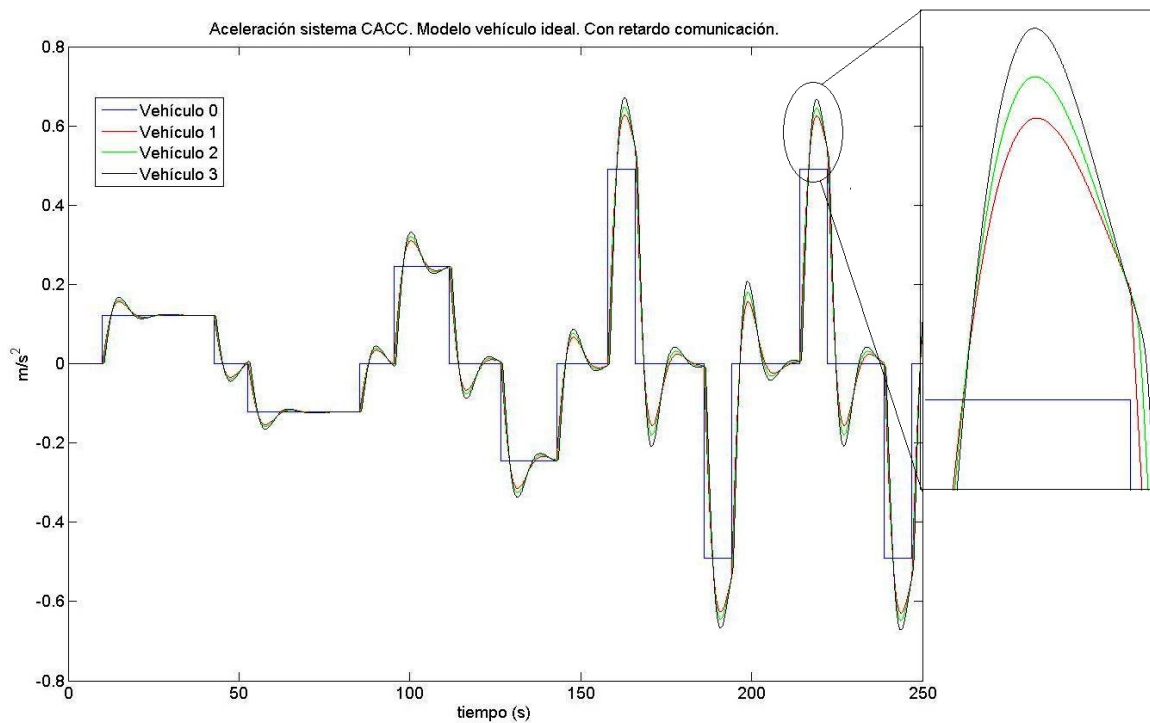


Figura 3.22: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres vehículos iguales con modelo $1/s^2$ equipados con sistema CACC con retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 0,1s$.

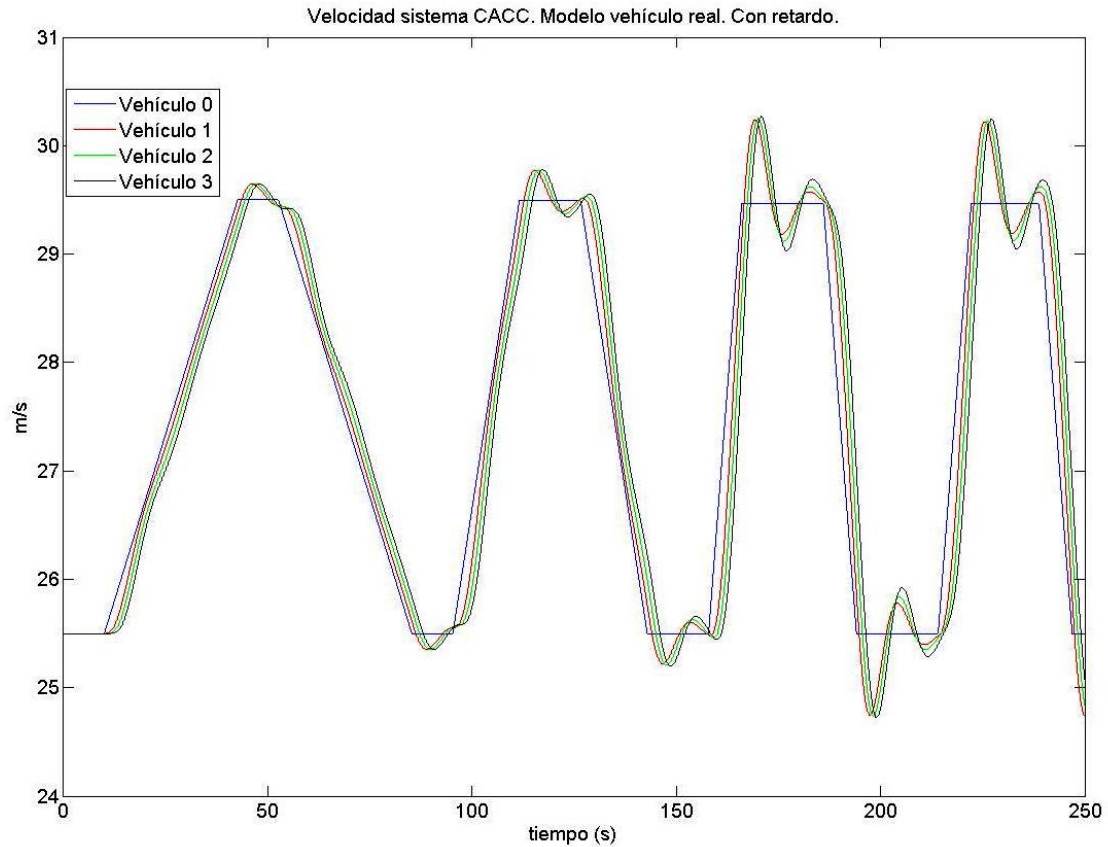


Figura 3.23: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos iguales con modelo real equipados con sistema CACC con retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 0,9s$.

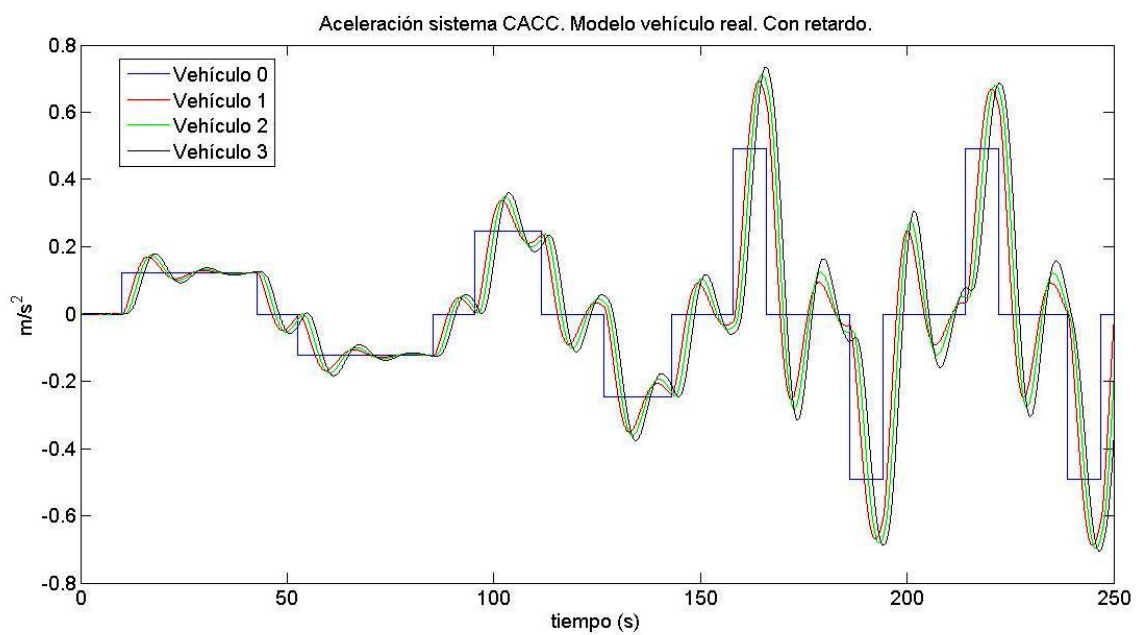


Figura 3.24: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres vehículos iguales con modelo real equipados con sistema CACC con retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 0,9s$.

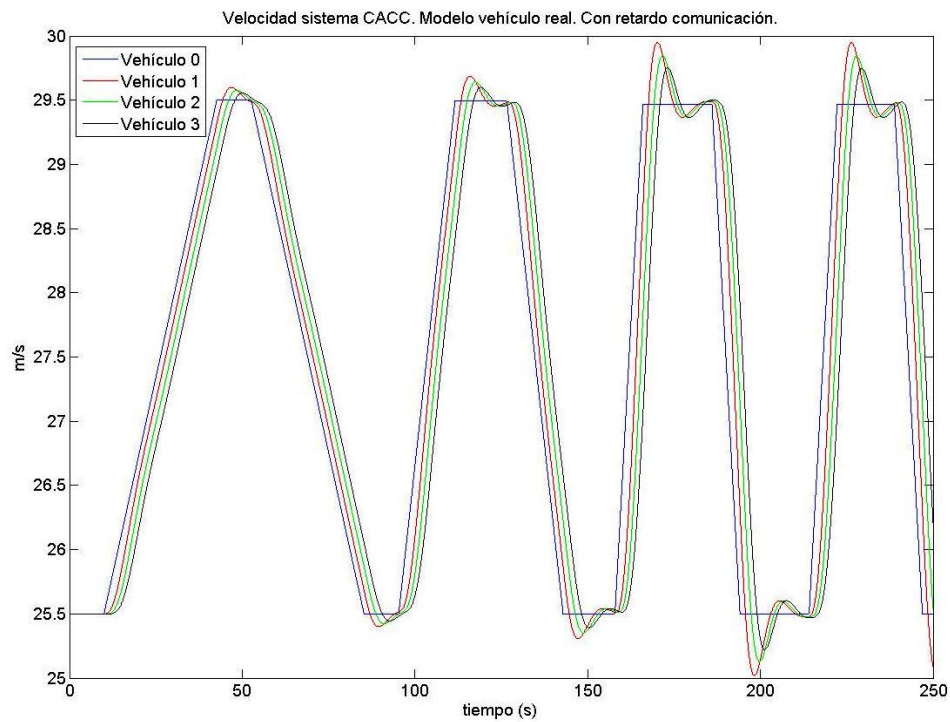


Figura 3.25: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos iguales con modelo real equipados con sistema CACC con retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$.

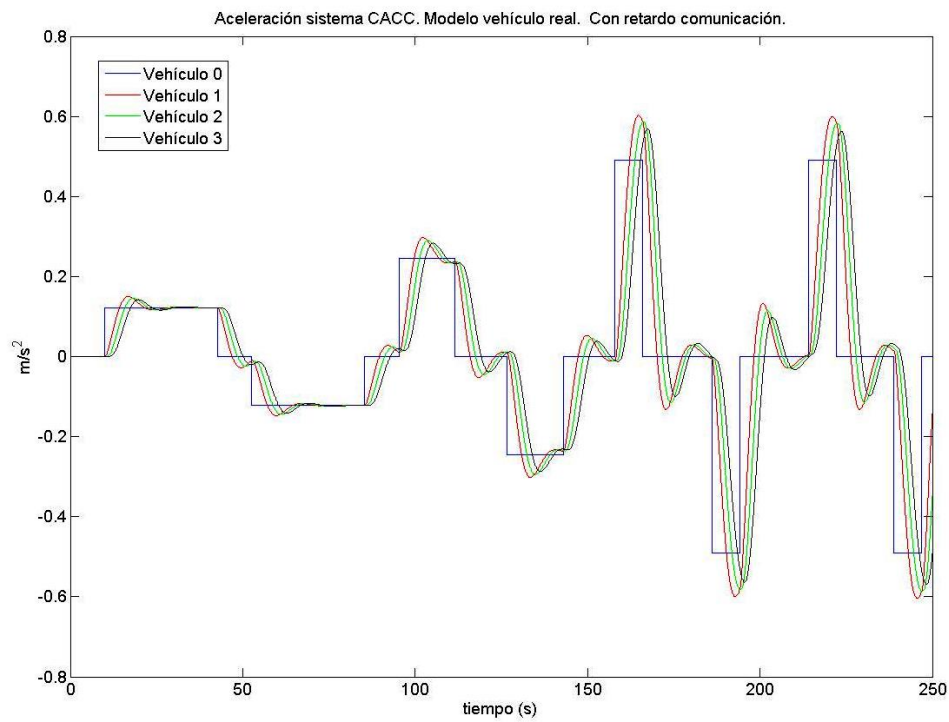


Figura 3.26: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres vehículos iguales con modelo real equipados con sistema CACC con retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$.

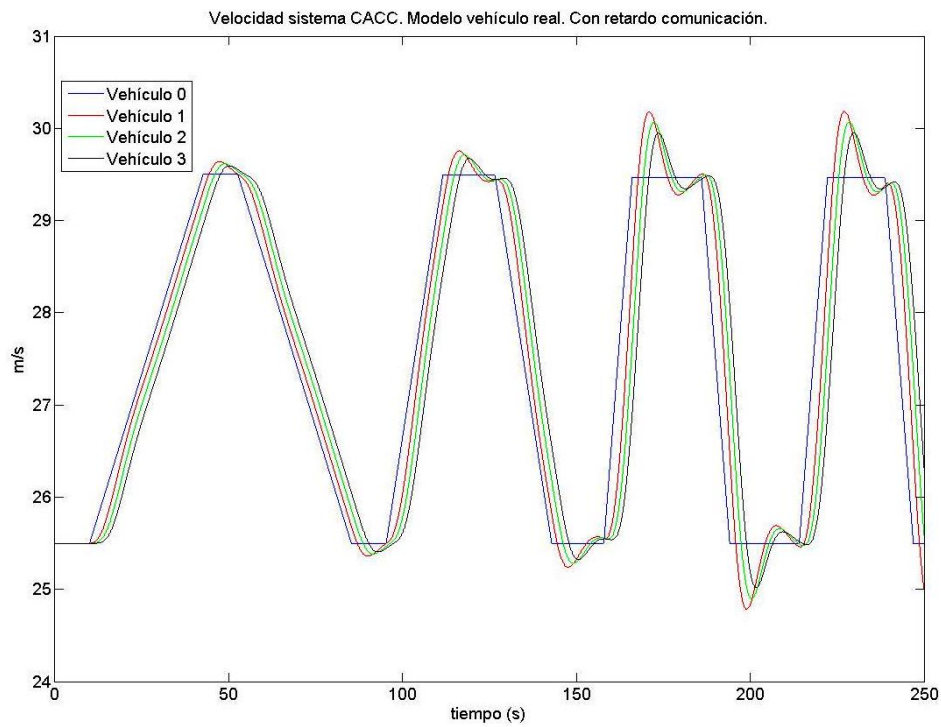


Figura 3.27: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos distintos con modelo real equipados con sistema CACC con retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$.

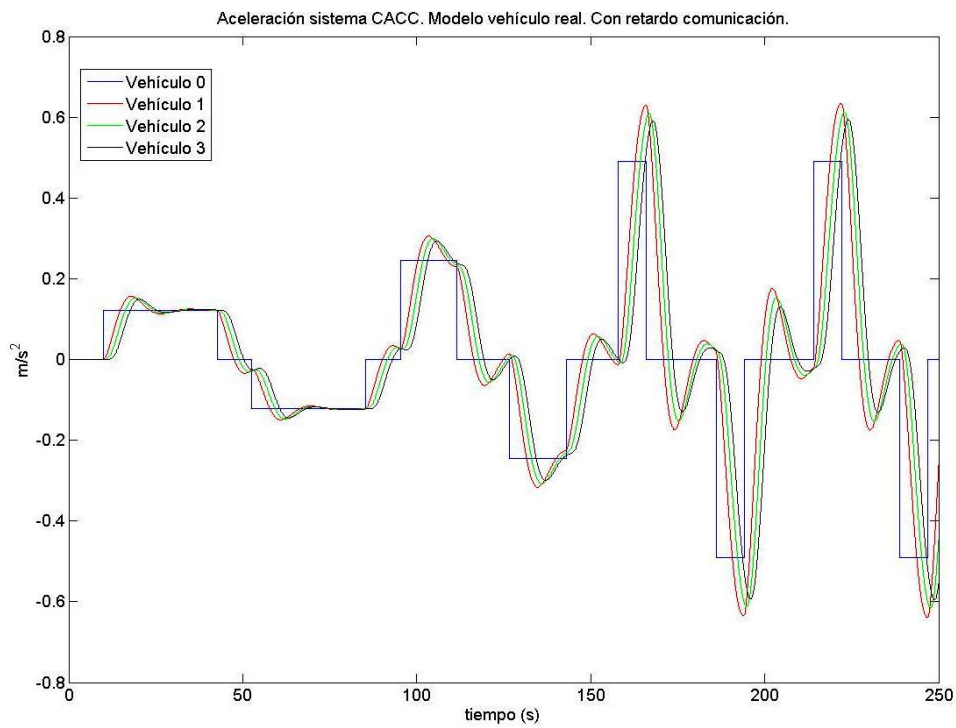


Figura 3.28: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres vehículos distintos con modelo real equipados con sistema CACC con retardo en la comunicación. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$.

Capítulo 4

Sistema CACC para 3 robots en convoy

4.1 Introducción

En el presente capítulo, se llevará a cabo la adaptación de los sistemas de control de velocidad [ACC](#) y [CACC](#) estudiados para vehículos a la tecnología existente en el laboratorio. Dicha adaptación recae en la indisponibilidad de vehículos reales para la realización de pruebas experimentales; como sustitutos se dispone de varios robots Pioneer, dígase P3DX y P3AT.

El robot Pioneer 3 DX es un robot móvil con movimiento diferencial. Consta de un microcontrolador embebido, motores con encóders de 500 ticks, que proporciona información odométrica, dos ruedas de 19 cm de diámetro, cuerpo de aluminio y un total de 8 sensores ultrasónicos. Es necesario añadir un ordenador interno o utilizar un portátil para su uso. Sus dimensiones son 45.5x38.1x23.7 cm, y pesa 9 kg. El mismo se muestra en la figura [4.1](#).



Figura 4.1: Robot P3DX.

El robot Pioneer 3 AT a diferencia del anterior, es un robot de 4 ruedas de 22 cm de diámetro, con encóders de 100 ticks, capaz de proporcionar información de posición y velocidad. Consta también de un microcontrolador embebido y un total de 16 sensores ultrasónicos. Es necesario añadir un ordenador

interno o utilizar un portátil para su uso. Sus dimensiones son 50.8x49.7x27.7 cm, y pesa 12 kg. El mismo se muestra en la figura 4.2.

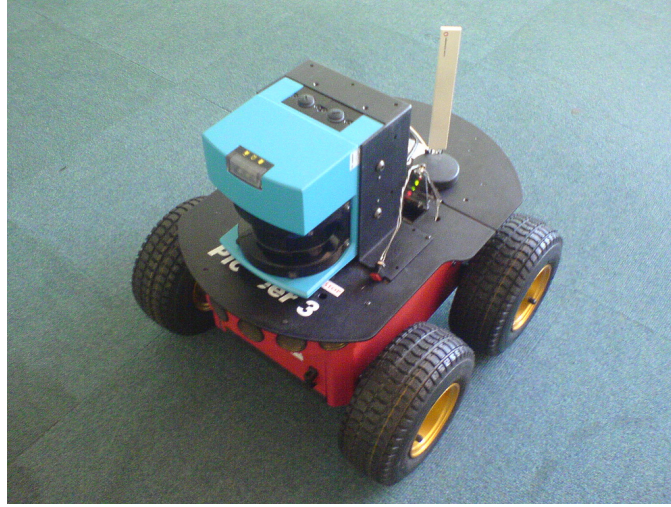


Figura 4.2: Robot P3AT.

En la literatura disponible sólo se ha obtenido el modelo en [VVEE](#) del P3DX. Dicho modelo se empleará en el resto del capítulo para la modificación de la estructura de control, de forma que se obtenga un controlador “genérico” para todos los robots disponibles de la familia Pioneer (el modelo dinámico de cada uno de ellos es similar). El modelo del P3DX también se usará en el proceso de verificación de ambos sistemas mediante MATLAB/Simulink.

Otras aspectos a tener en cuenta en el proceso de verificación de los sistemas de control son las limitaciones impuestas por el propio robot, así como por la red inalámbrica. La primera de ellas hace referencia a la frecuencia de muestreo de los sensores del robot y del microcontrolador; la segunda ha sido estudiada en parte en el capítulo 3, modelando un retardo constante en el envío de la información a través de la red inalámbrica.

Por último, los sistemas de control [ACC](#) y [CACC](#) diseñados a través de MATLAB/Simulink serán traducidos a lenguaje C para su implementación real. Para comprobar que dicha “traducción” se ha llevado a cabo de forma satisfactoria se empleará como herramienta de verificación Player Stage, herramienta ampliamente utilizada en el mundo de la robótica. En la misma se usará el modelo más similar al P3-DX disponible en la librería, robot P2-DX.

4.2 Modelo en VVEE del robot

El modelo en [VVEE](#) del robot P3DX mencionado con anterioridad ha sido obtenido mediante técnicas de identificación y validación a través de ensayos experimentales en [\[Santos et al., 2014\]](#). La velocidad lineal y angular, generadas en un PC, son enviadas al robot para registrar la respuesta del mismo en lazo abierto. Un retardo constante en el canal de L segundos es incluido en el modelo del robot, donde este elemento no lineal es aproximado mediante Padé, el cuál es un método que aproxima el retardo en el dominio de Laplace a través de un modelo racional. En este caso el retardo L del canal es aproximado como:

$$e^{-Ls} = \frac{1 - \frac{L}{2}s}{1 + \frac{L}{2}s} \quad (4.1)$$

Así, el modelo en VVEE del robot P3DX en tiempo continuo resulta:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} -4,094 & -0,015 & 1664 & 0,7227 \\ -0,008 & -5,042 & 0,326 & 2023 \\ 0 & 0 & -200 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -200 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} -4,159 & -0,002 \\ -0,001 & -5,057 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Notar que el objetivo del proyecto es un control de velocidad lineal, y el modelo en VVEE expresado en 4.2 presenta cuatro estados, dos de ellos correspondientes al retardo en el canal de comunicación, y otros dos a velocidad lineal y angular. Esto es, de dicho modelo sólo se utilizará la entrada de control correspondiente a la velocidad lineal, y por tanto la parte del modelo que afecte a la misma. La señal de control de la velocidad angular se mantendrá nula.

Por otra parte, a la hora de la validación de los sistema de control es importante discretizar el modelo del robot, ya que en la realidad no existe un funcionamiento en tiempo continuo, sino que el robot tendrá una determinada frecuencia de funcionamiento (se verá en el siguiente apartado). La planta discretizada con un periodo de 100 ms queda:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{k+1} &= \begin{bmatrix} 0,664 & -0,001 & 5,6403 & -0,0069 \\ -0,0005 & 0,6040 & -0,0031 & 6,2673 \\ 0 & 0 & 2,06e^{-9} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,06e^{-9} \end{bmatrix} x_k + \begin{bmatrix} -0,3132 & -0,0001 \\ -0,0001 & 0,3659 \\ 0,005 & 0 \\ 0 & 0,005 \end{bmatrix} u_k \\ y_k &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x_k \end{aligned} \quad (4.3)$$

4.3 Limitaciones reales robot

Es importante hacer un estudio de las características reales de cada uno de los robots, para saber si las mismas afectarán a la estructura de control y a la implementación real del mismo.

Según el fabricante, las limitaciones reales para los robots P3DX y P3AT son similares. Éstos disponen de un microcontrolador 44.2368 MHz Renesas SH2 32 bits RISC, con un software de control ARCOS. Siendo capaz de llevar a cabo operaciones de mantenimiento de velocidad y lectura de sensores mediante conexión a un PC a través del link HOST serie. Mediante ese ordenador también es posible proveer al robot de una inteligencia superior, a través de la realización de una determinada aplicación (dígase la aplicación que habrá que desarrollar para obtener el sistema de control). El envío de paquetes a través de ARCOS se realiza cada 100 ms.

En cuanto a los límites de velocidad de los robots varían, la velocidad lineal máxima para el robot P3DX es 1.2 m/s, mientras que para el P3AT es 0.7 m/s; la velocidad angular para el P3DX es 300°/s, en cambio para el P3AT es inferior al disponer de 4 ruedas, 140°/s.

Por otra parte, también es necesario tener bajo consideración las limitaciones de los sensores ultrasónicos. Los mismos tienen un rango de operación de 10 cm a 5 m (suficiente para el desarrollo de la aplicación, ya que la distancia máxima alcanzable entre vehículos será de 3 metros), y un periodo de

Tabla 4.1: Tabla comparativa Robots P3DX y P3AT.

	P3DX	P3AT
Hardware	Micropr. Renesas SH2	Micropr. Renesas SH2
Software	ARCOS	ARCOS
Envío Paquetes info.	100 ms	100 ms
Necesidad ordenador	Si	Si
Encóder	500 ticks/mm	500 ticks/mm
Velocidad lineal máx.	1.2 m/s	0.7 m/s
Velocidad angular máx.	300°/s	140°/s
Sensor distancia	Láser Hokuyo	Láser Hokuyo

actualización de 50 ms, superior al de ARCOS. Trigonómicamente, como la parte trasera de un P3AT mide 49.7 cm y los sensores ultrasónicos frontales para medir la distancia entre robots se encuentran en $\pm 12^\circ$, la distancia frontal máxima medible resulta insuficiente para la aplicación. De ahí, la necesidad de emplear láser.

El láser que se empleará es el Hokuyo URG-04LX que se muestra en la figura 4.3. El mismo tiene un rango de operación de 20 mm a 5.6 m con una resolución de 1 mm (suficiente también para la aplicación). En este caso, el láser tiene un barrido de 240° con una resolución angular de 0.333° , por lo que para obtener la distancia entre robots, únicamente sería necesario obtener el dato correspondiente al ángulo de 120° . La actualización de los datos del láser coincide con el periodo de actualización de ARCOS, 100 ms.



Figura 4.3: Láser Hokuyo URG-04LX.

Por último, en la tabla 4.1 se resumen las características de cada uno de los robots a utilizar.

4.4 Imperfecciones introducidas por la red inalámbrica

Ya es conocido que el sistema CACC requiere de una red inalámbrica para recibir la aceleración del vehículo predecesor. Esta red no es perfecta, y presenta imperfecciones que afecta a la estabilidad de cadena, que se presentan a continuación.

La primera de ellas ya ha salido modelada en el capítulo anterior, el retardo inducido por la propia red. El retardo de la comunicación se encuentra afectado principalmente por el número de vehículos que comparte la red. El hecho de que el número de vehículos en el pelotón tenga una dinámica más lenta que la cadena hace que los retardos se consideren constantes. Se entiende por retardo grande, aquel cuyo valor supera el periodo de muestreo, esto es, 100 ms. Su implementación en la etapa de validación del sistema es sencilla a través de MATLAB/simulink: bloque “Communication delay” en tiempo continuo; o aproximación de Padé de la ecuación 4.1 para el caso discreto.

Otra limitación real de las redes inalámbricas es la pérdida de paquetes. Hablamos de pérdida de paquetes cuando parte de la información enviada de un lugar a otro se extravía. Es sencillo imaginar como la pérdida de un paquete de aceleración afecta al sistema CACC. Por ejemplo, si el vehículo predecesor está frenando y previamente estaba acelerando, y se extravían los últimos paquetes de frenado, el resultado sería una colisión derivada de la inestabilidad de cadena.

Otro aspecto a considerar es la pérdida de señal en función de la distancia a la que se encuentre los distintos nodos de la red. La pérdida de señal según la distancia que separan los nodos, se modela a través del modelo de propagación que se muestra en la ecuación 4.4.

$$P_{receiver} = \frac{1}{d^\alpha} P_{sender} \quad (4.4)$$

A fin de realizar un estudio comparativo entre los resultados del capítulo 3 y los del presete, se mantiene la premisa de consideración única de un retardo constante en la red inalámbrica.

4.5 Modificación estructura de control sistema ACC

En este caso, el sistema de control es similar al estudiado para vehículos en el capítulo 3, sólo que en vez de utilizar el modelo de vehículo expresado en 3.3, se considera una cadena formada por 3 robots P3DX, ya que es el único modelo en VVEE correctamente identificado y disponible. El modelo en VVEE a utilizar, varía si el estudio se realiza en tiempo continuo (ecuación 4.2) o en tiempo discreto (ecuación 4.3). Ya es conocido que dicho modelo presenta 4 estados, de los cuales sólo interesa el correspondiente a la velocidad lineal. Siguiendo dicha premisa, podemos obtener la función de transferencia que expresa posición en función de la aceleración comandada, con el modelo en VVEE que expresa velocidad lineal de salida en función de la velocidad lineal comandada, y dos integradores. La función de transferencia 4.5 en tiempo continuo, o la versión discreta (ecuación 4.6) de la misma servirá para el desarrollo del sistema CACC en el apartado 4.8.

$$G_i(s) = \frac{s + 5}{s^2(s + 5)(s + 4,1)} \quad (4.5)$$

$$G_i(z) = 1,5089e^{-4} \frac{(z + 3,381)(z + 0,241)}{(z - 1)^2(z - 0,6637)} \quad (4.6)$$

Recordamos que el objetivo de la estrategia de espaciamiento es seguir al robot predecesor a la posición relativa expresada por 3.7. Dicha información se obtendrá a través del láser Hokuyo, y seguirá sirviendo como realimentación de nuestro sistema de control ACC. Así, el objetivo es controlar el error de espaciamiento de la ecuación 3.9. Dicha acción de control, aceleración, es definida como $u_i(t)$, y es la salida de $K_i(s)$, correspondiente al controlador PD estudiado; la misma se aplica a $G_i(s)$. El control resultante es el mismo que se muestra en la Figura 3.2.

Al aplicar la limitación real del periodo de actualización del microprocesador a 100 ms, es necesario discretizar todo el control a dicho periodo. Esto es, el controlador PD continuo (ver ecuación 4.7) pasa a su forma discreta 4.8.

$$U(s) = K_p(1 + T_d s)E(s) \quad (4.7)$$

$$U(z) = K_p(1 + T_d \frac{(1 - z^{-1})}{T})E(z) \quad (4.8)$$

donde K_p es la constante proporcional del controlador PD, $K_p T_d$ la constante de la parte derivativa, $U(z)$ la aceleración, $E(z)$ el error de espaciamiento y T el periodo de actualización del microprocesador.

4.6 Validación sistema ACC mediante MATLAB/Simulink

En el presente apartado, se lleva a cabo la validación del sistema ACC con los cambios introducidos al utilizar 3 robots P3DX en vez de 3 vehículos. En primer lugar, se describirá la nueva curva de velocidad del robot de referencia ajustada al límite de velocidad estudiados para el robot P3-DX; posteriormente se pasará al análisis de estabilidad de cadena para la situación de tráfico homogéneo, comprobándose si se sigue cumpliendo los valores de “head time” que hacen al sistema estable bajo la situación de vehículo ideal $1/s^2$; por último, también se comprobará si la discretización del sistema de control a 100 ms, afecta a la estabilidad del sistema.

El primer robot de la cadena tiene como posición de referencia la de un robot 0. El perfil del robot de referencia se obtiene a partir de un perfil de velocidad. Dicho perfil de velocidad consiste en la siguiente serie de cambios. En el primer ciclo, el vehículo va a $0,25m/s$ durante 10s; después, acelera a una aceleración constante de $0,022m/s^2$ hasta alcanzar una velocidad de $0,9m/s$. La velocidad se mantiene constante durante 10s, antes de que el vehículo comience a decelerar a $-0,022m/s^2$ para volver a una velocidad constante de $0,25m/s$ durante otros 10s. El segundo ciclo repite la misma curva de aceleración y deceleración, sólo que con una magnitud de $0,0325m/s^2$ y 10s de velocidad constante. Por último, el tercer ciclo repite otra vez el mismo patrón a $0,065m/s^2$ con 20s de velocidad constante.

Notar como en este caso, al emplear un modelo del robot P3DX obtenido a través de las correspondientes técnicas de identificación, los grados de libertad del modelo disminuyen, esto es, no vamos a determinar un parámetro que defina la dinámica del sistema η_i , o un retardo en el actuador interno del sistema τ_i ; todo esto ya está incluido en los modelos en VVEE 4.2 y 4.3, por lo que las únicas variables sobre las que se puede actuar es el ancho de banda del controlador $\omega_{c,i}$ y el “head time” $h_{d,i}$. Como queremos que la respuesta del sistema sea parecida a la que se tendría en un vehículo real, el ancho de banda del controlador se mantiene en $\omega_{c,i} = 0,5$, y por tanto, se mantiene el valor de “head time” de 3 s para el caso estable, y 2 s para el caso inestable.

La tabla 4.2 corresponde al caso continuo y estable. Los resultados de velocidad, aceleración y posición relativa se muestran en las figura 4.4, 4.5 y 4.6. Se comprueba como el sistema es estable con un $h_{d,i} = 3s$.

Para el caso discreto, los resultados son prácticamente idénticos. No existen diferencias apreciables. Las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 demuestran que los cambios son mínimos.

Por último, los resultados que se muestran en 4.10, 4.11 y 4.12 correspondientes a la tabla 4.3, demuestra que el sistema sigue siendo inestable con un $h_{d,i} = 2s$.

Tabla 4.2: Parámetros cadena de P3DX. Tráfico homogéneo. Tiempo continuo.

Robot i	$\omega_{c,i}$	$h_{d,i}$
1	0.5	3
2	0.5	3
3	0.5	3

Tabla 4.3: Parámetros cadena de P3DX. Tráfico homogéneo. Tiempo discreto.

Robot i	$\omega_{c,i}$	$h_{d,i}$	T
1	0.5	2	0.1
2	0.5	2	0.1
3	0.5	2	0.1

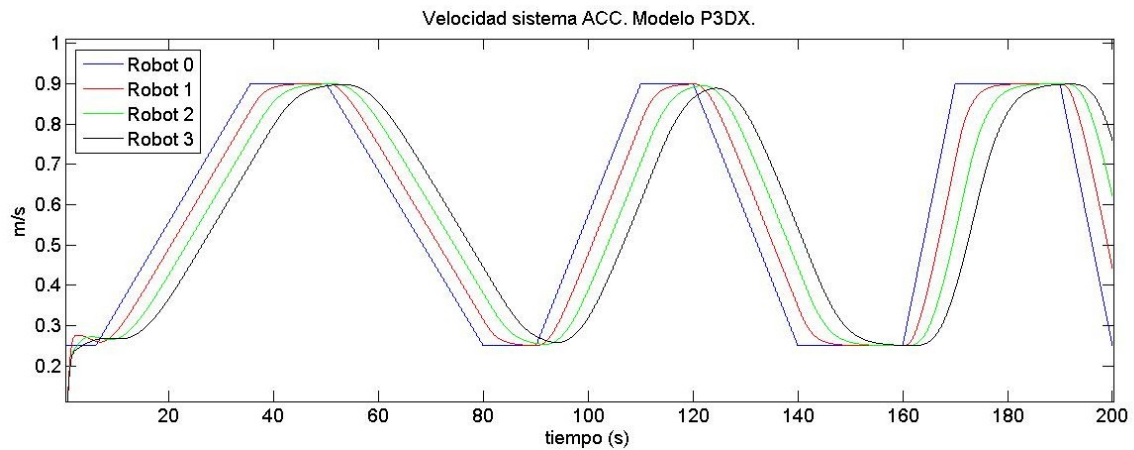


Figura 4.4: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Caso continuo.

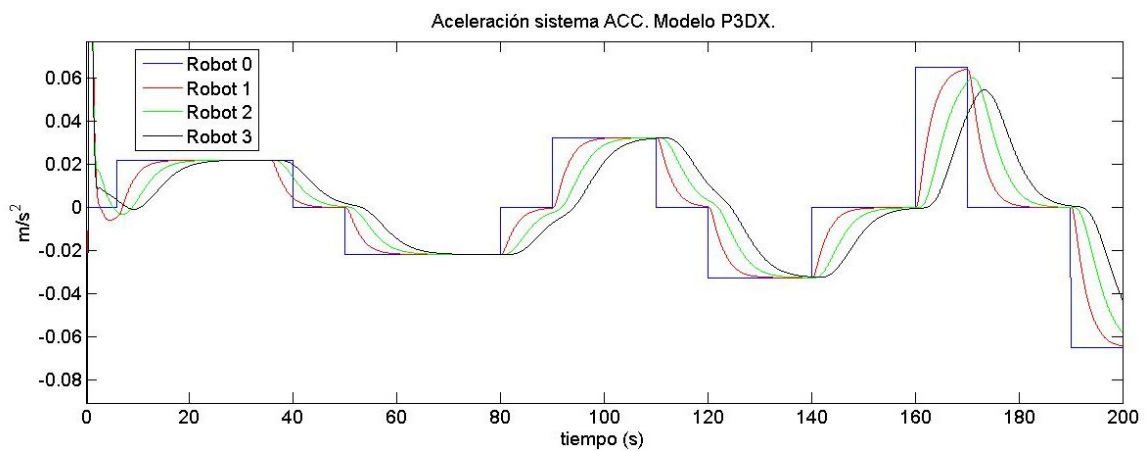


Figura 4.5: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Caso continuo.

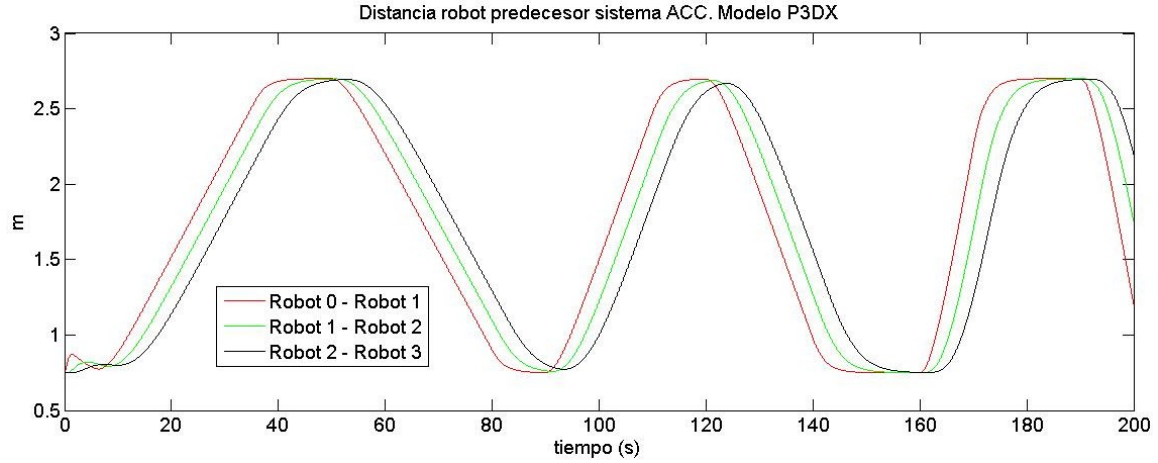


Figura 4.6: Resultados de simulación de posición realtiva para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Caso continuo.

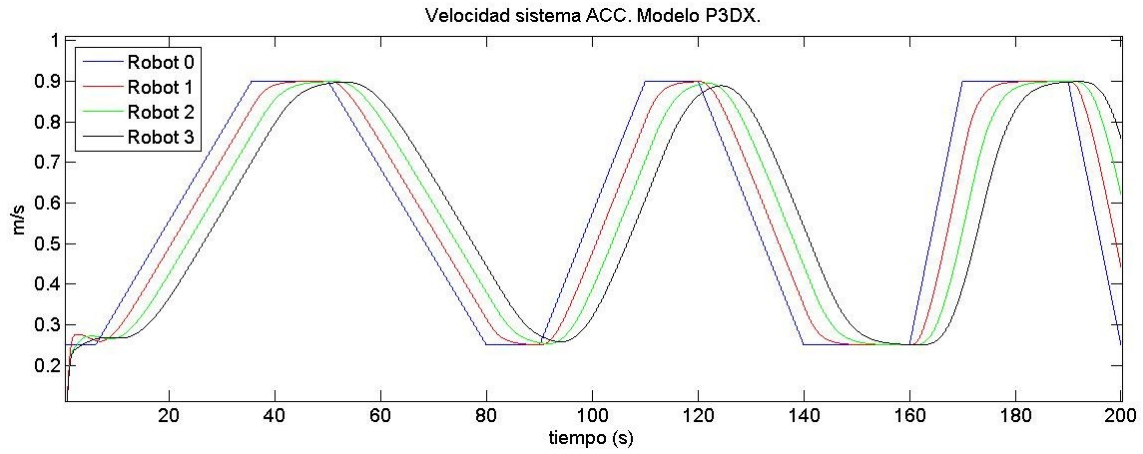


Figura 4.7: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Caso discreto.

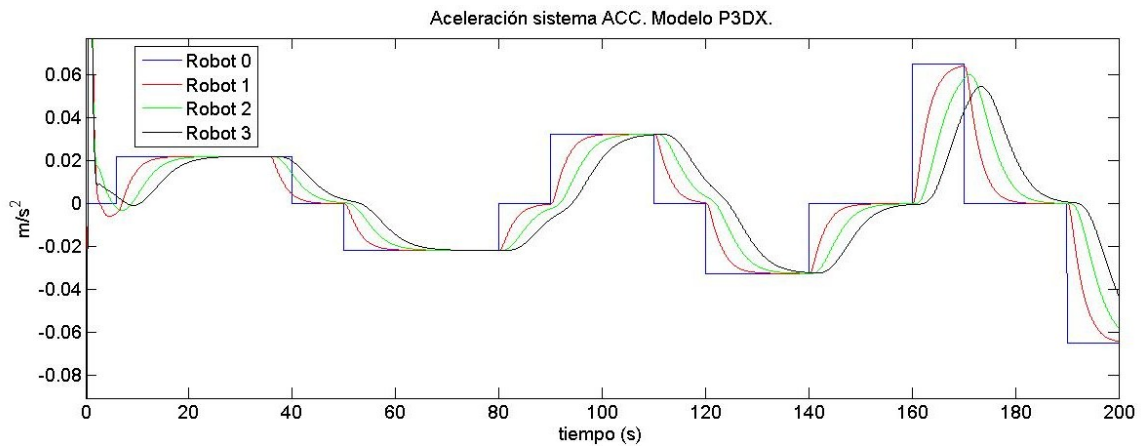


Figura 4.8: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Caso discreto.

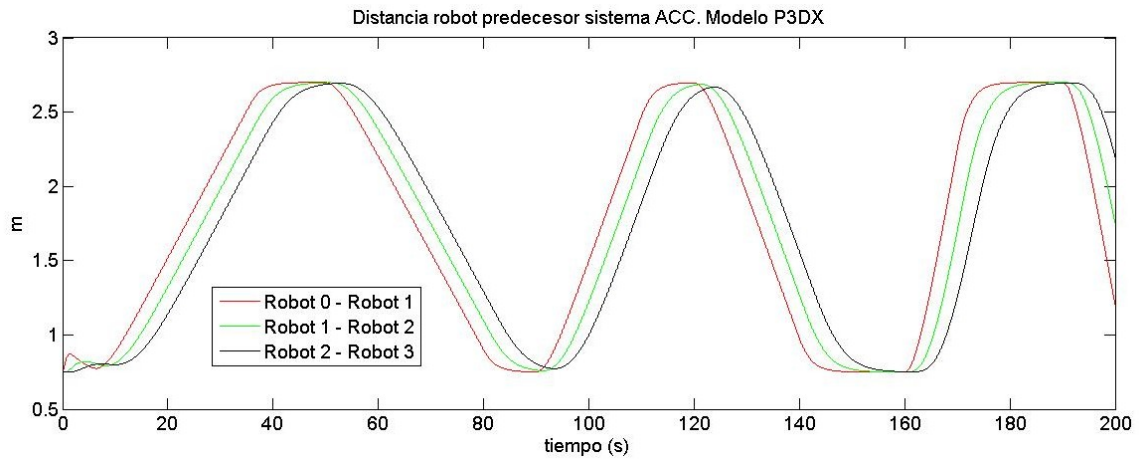


Figura 4.9: Resultados de simulación de posición realtiva para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Caso discreto.

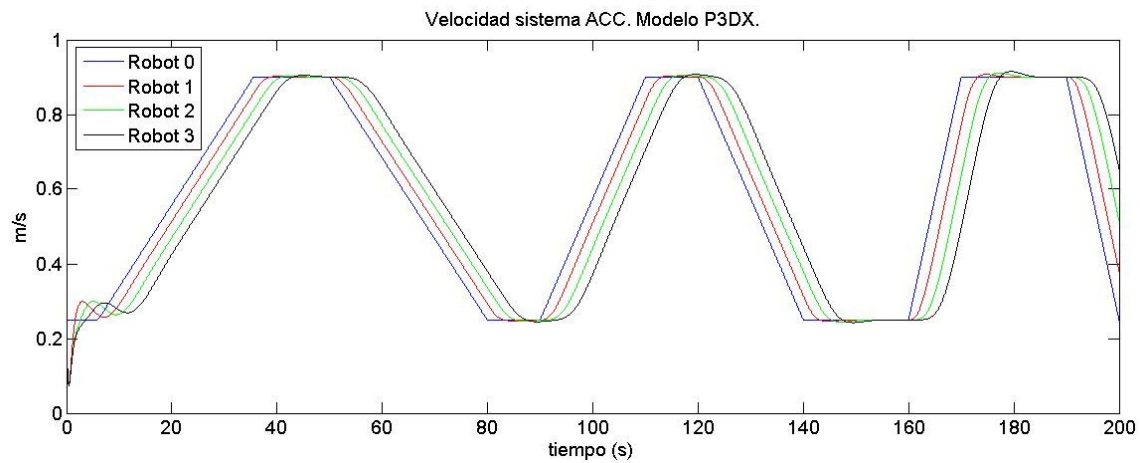


Figura 4.10: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 2s$. Caso discreto.

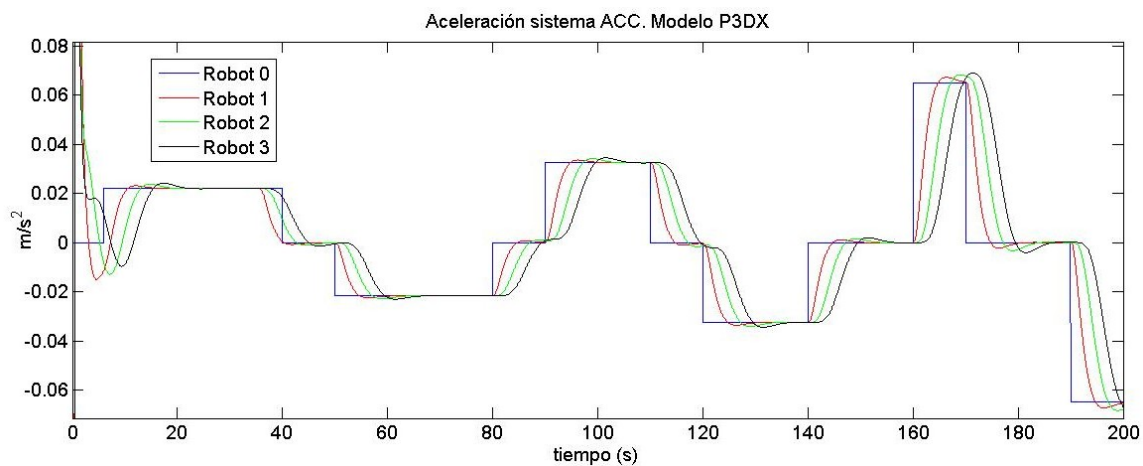


Figura 4.11: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 2s$. Caso discreto.

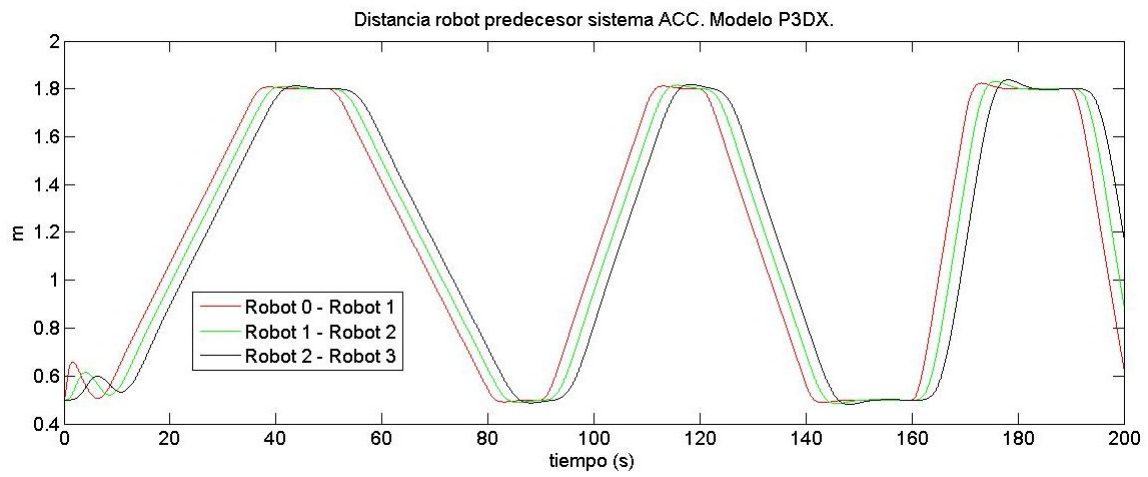


Figura 4.12: Resultados de simulación de posición realtiva para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 2s$. Caso discreto.

4.7 Validación sistema ACC mediante Player Stage

En el presente apartado, se realiza la traducción a lenguaje C necesaria del sistema ACC planteado en apartados anteriores para su validación a través de Player Stage. En 4.7.1 se realiza una breve descripción del software a emplear. Sucesivamente se definen los archivos de configuración necesarios en 4.7.2 para las aplicaciones cliente desarrolladas en 4.7.3.

4.7.1 Player Stage

Player es un entorno para el desarrollo de aplicaciones robóticas, desarrollado bajo licencia GNU. El mismo, se puede definir como un servidor de dispositivos, que proporciona una interfaz potente y flexible a gran variedad de sensores y actuadores robóticos.

Este servidor de dispositivos dispone de drivers que se conectan directamente con el hardware o con stage, proporcionando y tomando información de interfaces. Dichas interfaces son las que se emplearán en la aplicación cliente a desarrollar; con la consecuente abstracción del hardware.

Los drivers que se quieran utilizar deben ser especificados en un archivo con extensión .cfg. A su vez, cada uno de estos drivers tienen como campo de configuración las interfaces que requieren, ya sea para dar información o para recibirla. Es importante vincular cada driver y la interfaz correspondiente a una dirección concreta para poder realizar la lectura y el envío de datos de forma correcta.

Una vez está definido el archivo de configuración, en la aplicación cliente será necesario crear y subscribirse a las interfaces que queramos utilizar.

Por otra parte, Stage se trata de una herramienta de simulación 2D capaz de simular robots móviles y sensores asociados a los mismos. Entre los distintos robots disponibles que es capaz de simular, el más similar al P3DX es el P2DX. Como sensor se dispone de un modelo del láser hokuyo. Dicho robot en conjunto con sus sensores se encuentra dentro de un mundo, que se define en el fichero .world correspondiente. En dicho fichero, se carga una imagen correspondiente al mundo, pudiendo modificar longitudes, posiciones, color de cada uno de los robots, entre otras características.

4.7.2 Configuración

Para la verificación a realizar en el presente apartado es necesario un mundo, el driver stage, y dos interfaces: *position2d* y *laser*.

El mundo creado se trata de un pasillo recto y largo, suficiente para la comprobación de un controlador de velocidad lineal. Dentro del mismo, se encontrarán una cadena formada por 3 robot P2DX con la separación inicial óptima para la aplicación. En la figura 4.13 se muestra una imagen del mismo.

La interfaz *position2d* se emplea para el control del robot, a través de la misma se podrá controlar velocidad lineal y angular (*playerc_position2d_set_cmd_vel*), así como obtener información de su odometría (*position2d->vx*), dígame la velocidad necesaria como realimentación del sistema ACC.

La interfaz *laser* será la que nos facilitará la información de distancia relativa al robot que lo precede en la cadena. En el caso del leader de la cadena, esta información no será obtenida a través de un láser, sino que será leída de una matriz correspondiente al seguimiento de un robot de referencia 0 con un “head time” de 3 s. En el resto de robots se leerá la información directamente de la interfaz a través de: *laser->scan[135][0] - 0,32* (notar como es necesario restar 32 cm al valor recibido, ya que el láser se encuentra en el centro del robot (ver figura 4.13)).

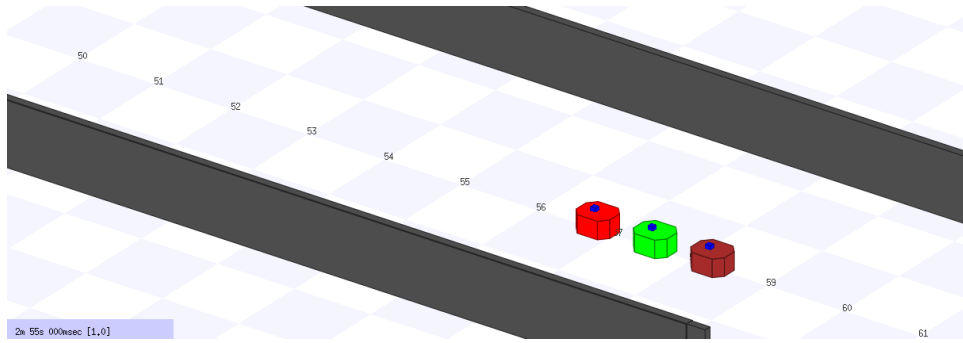


Figura 4.13: Mundo creado en Stage para la verificación del sistema ACC.

En la figura 4.14, se muestra la configuración llevada a cabo para la verificación del sistema ACC. En stage se dispone de un total de 3 robots P2DX, cada uno de ellos con un láser hokuyo, y de un modelo floorplan encargado de cargar a través de stage el pasillo mencionado con anterioridad. Notar las diferentes direcciones asociadas a las interfaces, que conectarán de forma local, en el mismo ordenador, con 3 aplicaciones clientes distintas, una por robot.

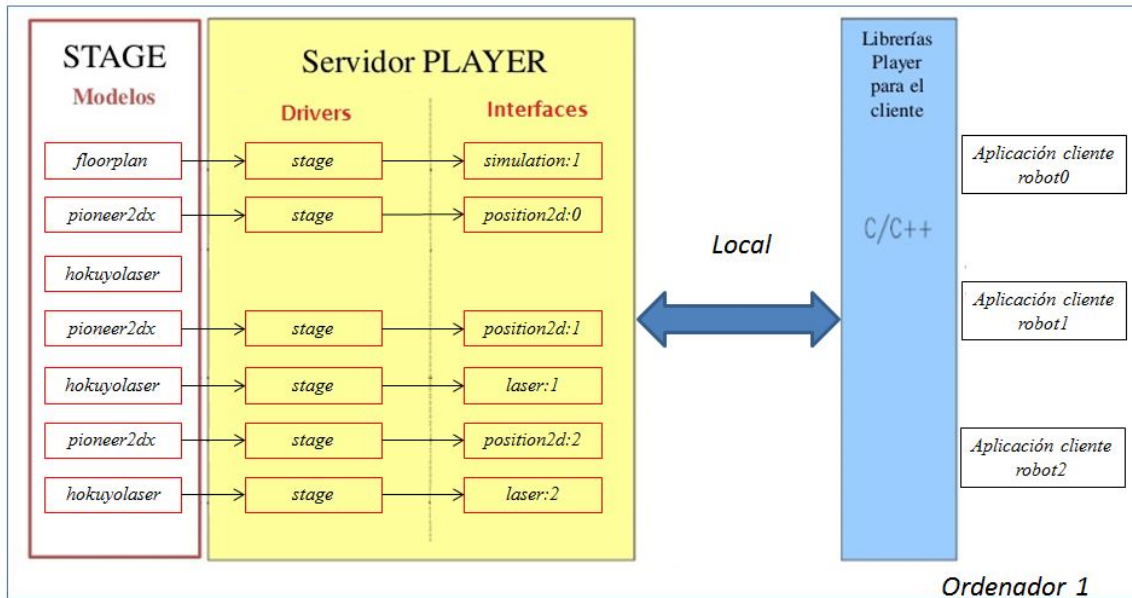


Figura 4.14: Esquema configuración simulación sistema ACC.

4.7.3 Aplicaciones cliente y validación

El diagrama de flujo de la aplicación correspondiente al leader de la cadena se muestra en la figura 4.15. En el mismo, se observa como al inicio de la aplicación es necesario la creación de un determinado cliente, que se suscribirá a la interfaz *position2d* con dirección 0. Tras esto se lleva a cabo la inicialización de las variables, entre las que se destaca la matriz de distancia frontal correspondiente a un robot de referencia; la distancia aquí obtenida corresponde a un “head time” de 3 s con la misma curva de velocidad del apartado 4.6, por tanto irá entre $[0,25 \cdot 3, 0,9 \cdot 3]$. Dicha matriz se empleará en el algoritmo, de forma que se evalúa en un loop el valor de cada uno de los elementos, tal que la distancia nunca sea inferior a 20 cm como método de seguridad. En el interior de dicho loop, es donde se lleva a cabo el controlador de velocidad como sigue:

- Escritura de datos de posición relativa al robot predecesor, velocidad y aceleración con el tiempo asociado tomado de la interfaz *position2d*: *position2d->info.datatime*. Notar como la velocidad debe ser derivada a través de la función *der_CACC* para poder obtener la aceleración.

```
// Obtención de aceleración a través de velocidad

double der_CACC (double vel_robot , double dt)
{
    static double pre_vel= 0;
    static double pre_pre_vel=0;
    double derivative;
    derivative= (vel_robot -pre_pre_vel)/(2*dt);

    //Update error
    pre_pre_vel=pre_vel;
    pre_vel= vel_robot;

    return derivative;
}
```

- Obtención del tiempo: Ya ha sido mencionado que es necesario obtener el tiempo a través de *position2d* para asociarlo al dato correspondiente y llevar a cabo una representación correcta. Pero no es la única necesidad. En el apartado 4.3 se mencionó como el envío de paquetes en ARCOs se realiza cada 100 ms; ahora bien, la lectura de dichos paquetes dependerá de la complejidad del algoritmo y de la carga computacional que el ordenador empleado esté soportando, por lo que es necesario calcular el tiempo transcurrido entre una iteración y la anterior. Dicha diferencia temporal *dt* se empleará para la realización de cualquiera de las derivadas o integrales necesarias en el algoritmo.
- Controlador PD: Recordamos que el objetivo del algoritmo es seguir al robot predecesor a la posición relativa expresada por 3.7. Dicha información está disponible a través de la interfaz *position2d* y de la matriz *dist_frontal*. Así, el objetivo es controlar el error de espaciamiento de la ecuación 3.9, obteniendo como salida del controlador PD una aceleración que será necesario integrar. La función PD se muestra a continuación:

```
//Controlador PD

double PD(double dist_frontal ,double est_espac , double dt)
{
    static double pre_error= 0;
    double error;
    double derivative;
    double output;

    error = dist_frontal -est_espac;

    derivative= (error -pre_error)/dt;
    output=Kp*error+ Kd*derivative;
```

```

//Saturation Filter
    if(output> 4)
    {
        output= 4; //Máxima aceleración
    }
    else if(output< -4)
    {
        output= -4; //Máxima deceleración
    }

//Update error
    pre_error= error;
    return output;
}

```

- Integración: Para poder controlar la velocidad lineal del robot es necesario emplear *playerc_position2d_set_cmd_vel*; y por tanto es necesario llevar a cabo la integración de la salida del controlador PD como sigue:

```

//Obtención de velocidad a partir de la señal salida del controlador PD

double integ(double acel_control, double dt)
{
    static double integrad=0;
    integrad =integrad+ acel_control*dt;

    if(integrad> 1.2)
    {
        integrad= 1.2; //Máxima Velocidad
    }
    else if(integrad< -1.2)
    {
        integrad= -1.2; //Mínima Velocidad
    }
    return integrad;
}

```

- Por último, se aplica la velocidad lineal obtenida, y se vuelve a evaluar la condición de funcionamiento, para ejecutarlo todo de nuevo. En caso de que dicha condición no se cumpla, se procede a parar al robot y a la destrucción de las subscripciones.

Las aplicaciones clientes de los otros dos robots de la cadena son muy similares a la que se acaba de explicar. La única diferencia radica en la lectura del láser a través de la interfaz en vez de la lectura de una matriz. Por tanto, es necesario la subscripción a dicha interfaz al inicio del algoritmo. En las figuras 4.16 y 4.17 se muestran los diagramas correspondiente al robot1 y al robot2. Notar que la única diferencia entre ambos se encuentra en las direcciones de subscripción de *position2d* y *laser*.

Ahora pasamos a comprobar si los resultados obtenidos con el algoritmo planteado coinciden con los obtenidos en el apartado 4.6. Al emplear el modelo de P2-DX disponible en la librería de Stage, no se

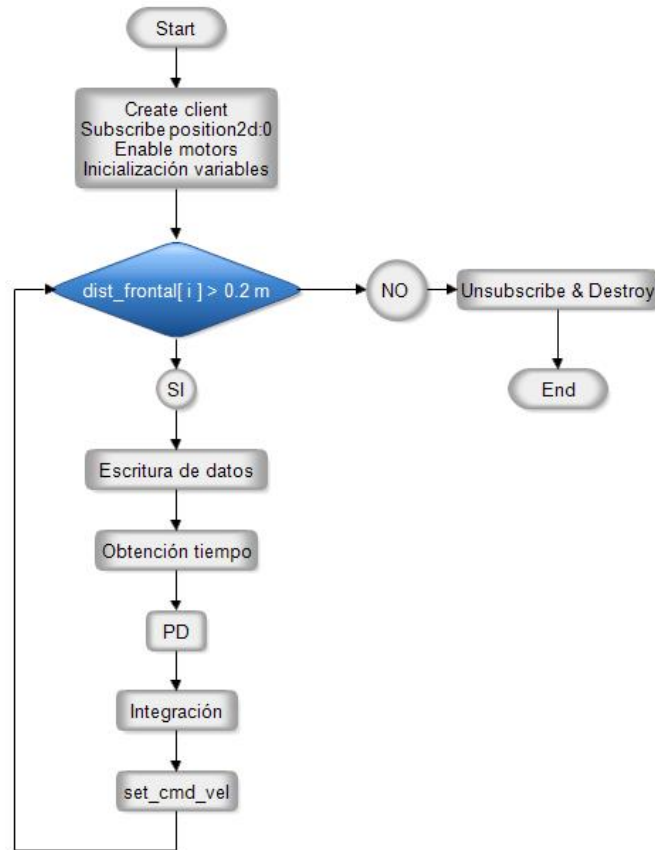


Figura 4.15: Diagrama aplicación cliente robot0 simulación sistema ACC.

Tabla 4.4: Parámetros cadena de P2DX. Tráfico homogéneo. Player Stage.

Robot i	$\omega_{c,i}$	$h_{d,i}$
1	0.5	3
2	0.5	3
3	0.5	3

definirán unas variables correspondientes a la dinámica del sistema η_i , o un retardo en el actuador interno del sistema τ_i ; todo ello ya se encuentra incluido en el modelo mencionado. Por tanto, las únicas variables sobre las que podemos actuar son el ancho de banda del controlador $\omega_{c,i}$ y el “head time” $h_{d,i}$. En el caso estable, el valor correspondiente a estas variables es el que se muestra en la tabla 4.4.

Con dichos valores a través de las figuras 4.18, 4.19 y 4.20, se demuestra el correcto funcionamiento aunque usemos un modelo distinto del P3DX y una plataforma distinta para la ejecución del algoritmo. El “head time” necesario para que la cadena sea estable también se mantiene.

Por último, a fin de obtener unos datos comparativos con la validación del sistema CACC en el apartado 4.10, se lleva a cabo la ejecución del algoritmo con un “head time” $h_{d,i} = 1,5s$, comprobándose a través de las figura 4.21, 4.22 y 4.23 la inestabilidad de cadena.

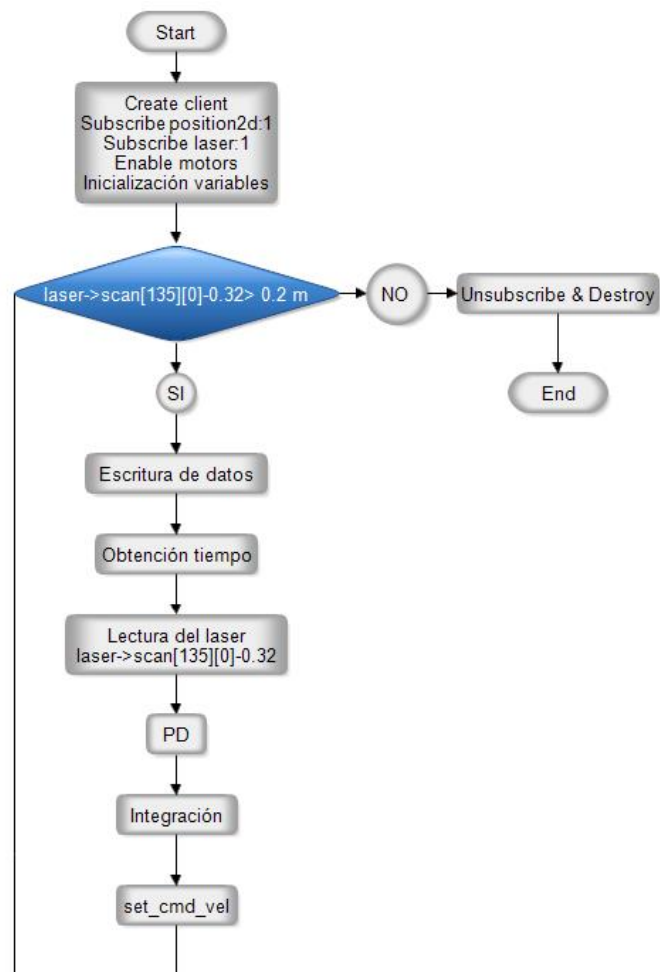


Figura 4.16: Diagrama aplicación cliente robot1 simulación sistema ACC.

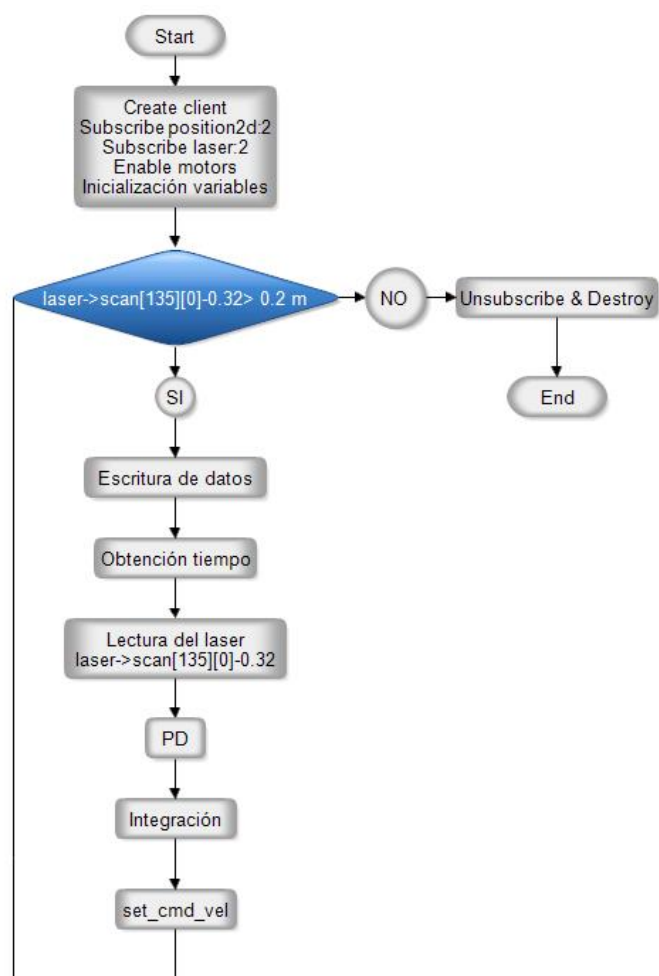


Figura 4.17: Diagrama aplicación cliente robot2 simulación sistema ACC.

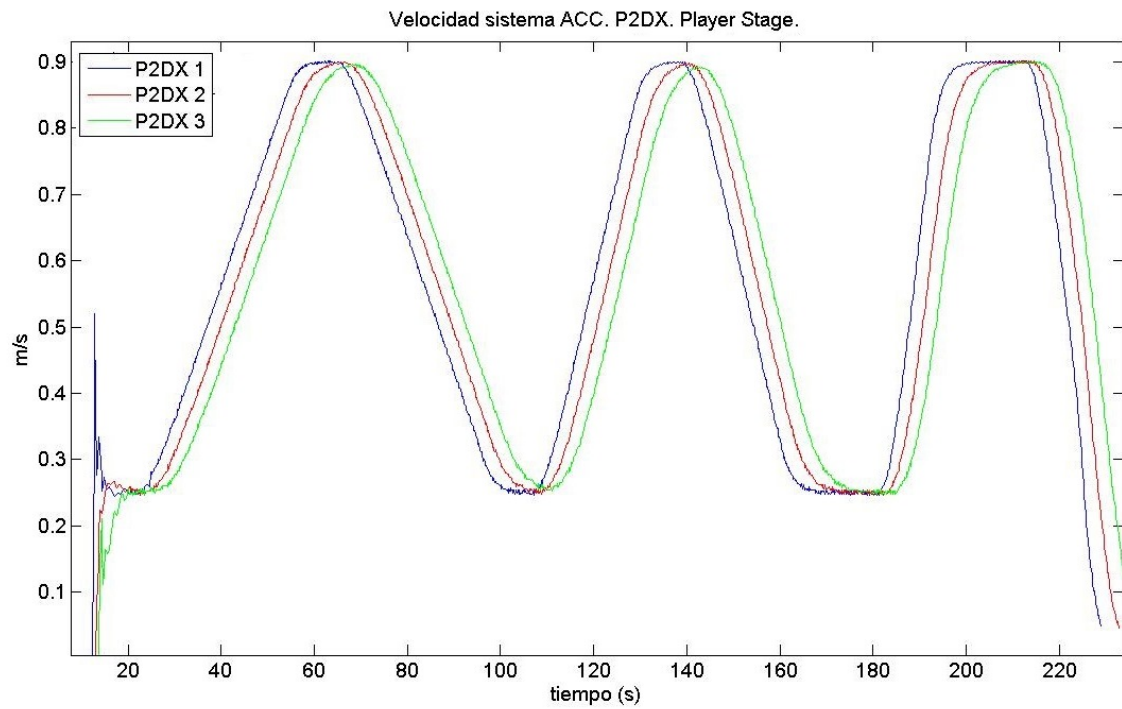


Figura 4.18: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Player Stage.

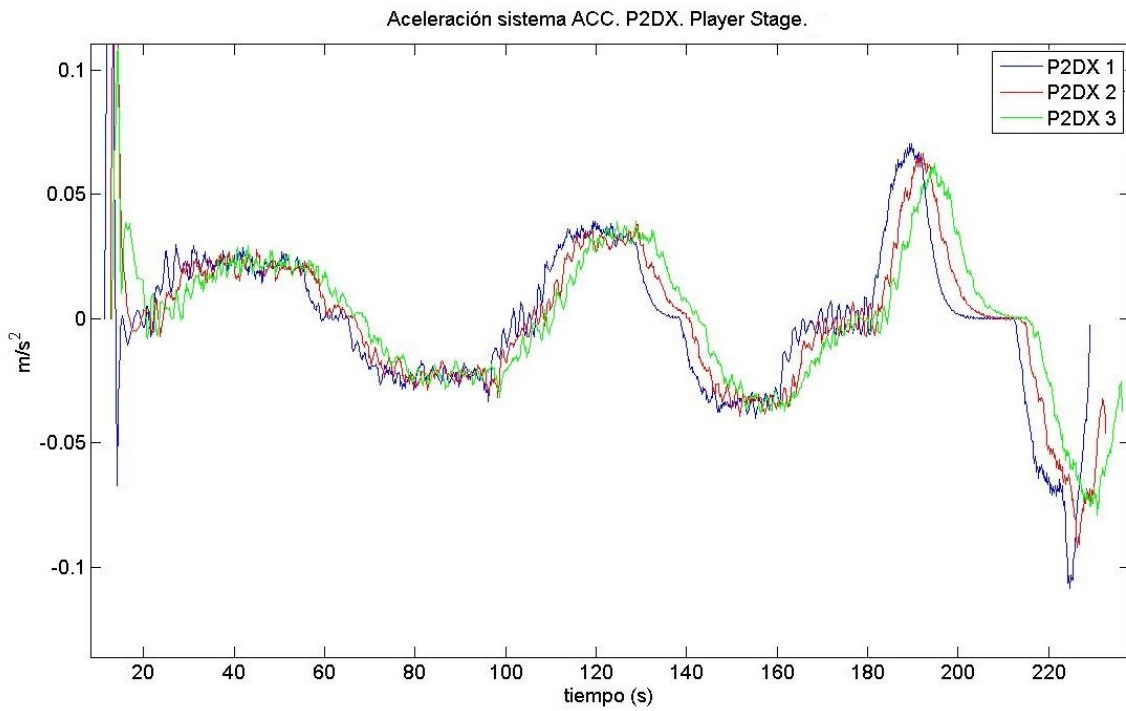


Figura 4.19: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Player Stage.

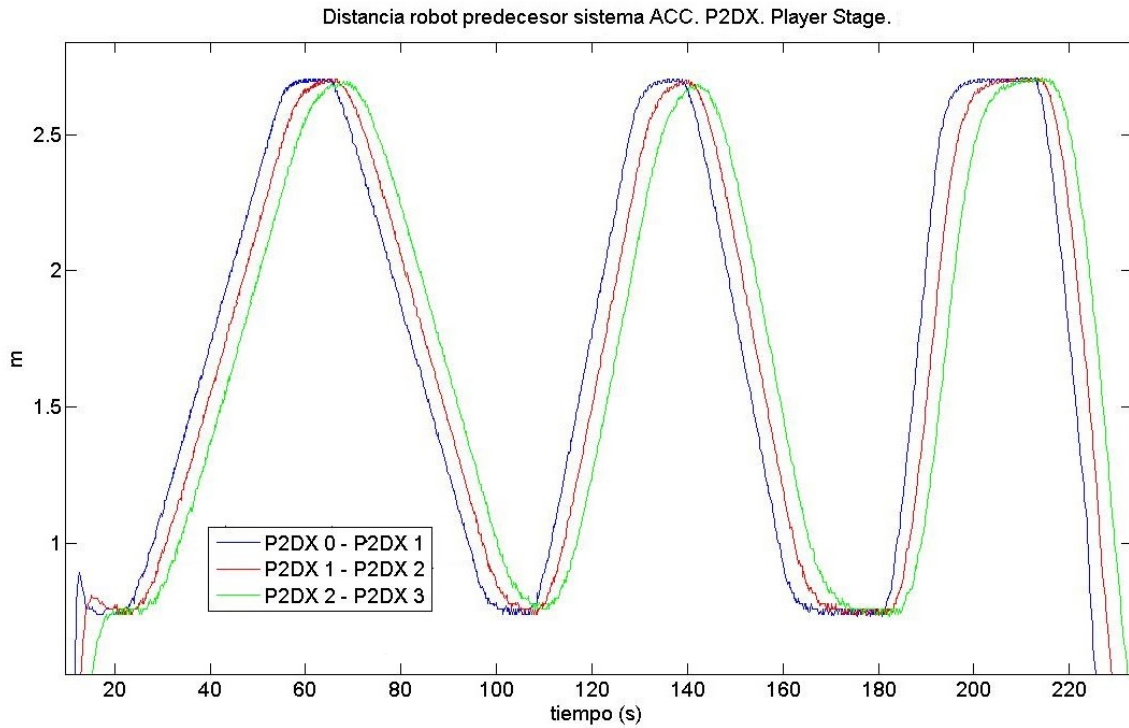


Figura 4.20: Resultados de simulación de posición relativa para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$. Player Stage.

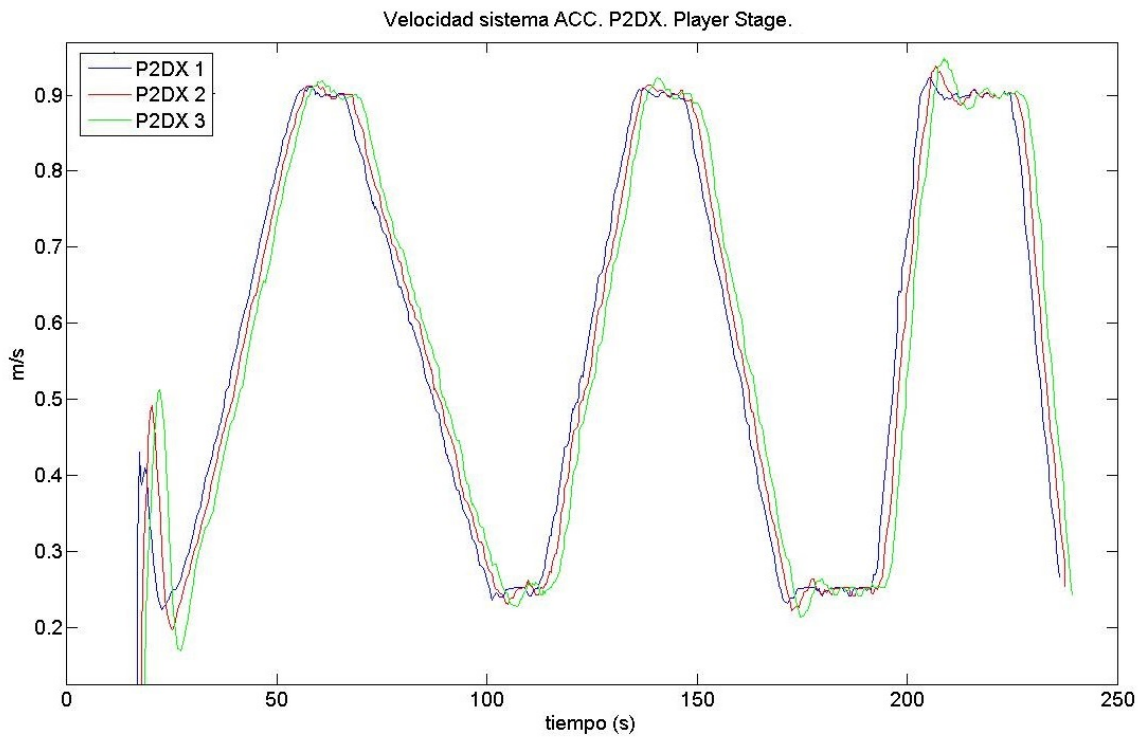


Figura 4.21: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage.

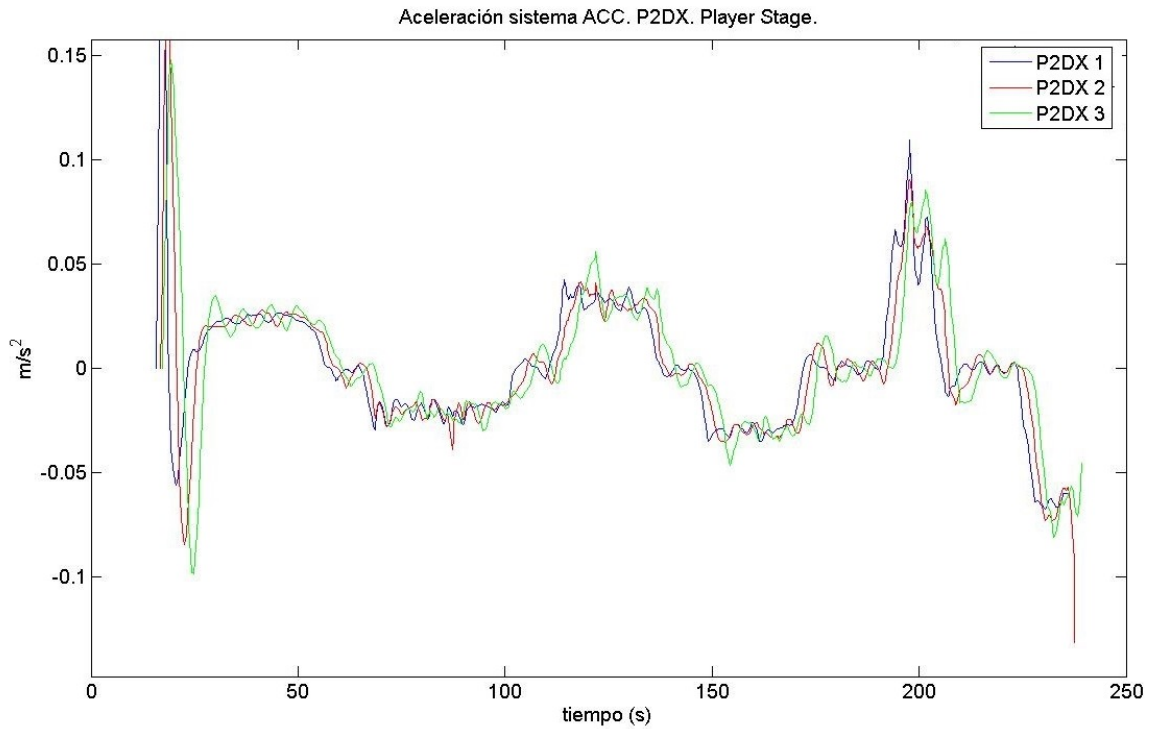


Figura 4.22: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage.

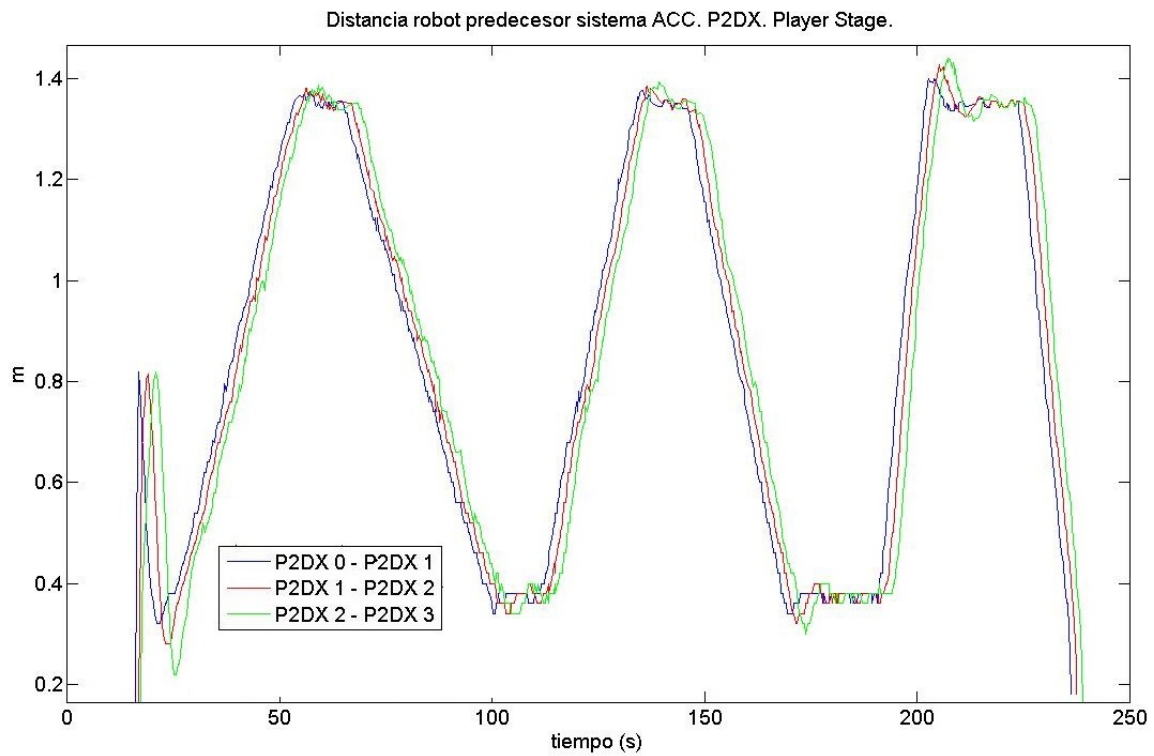


Figura 4.23: Resultados de simulación de posición relativa para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage.

4.8 Modificación estructura de control sistema CACC

Ya es conocido, que se considera sistema **CACC** a aquél sistema que tiene comunicación inalámbrica con su robot predecesor. A través de dicho canal estará disponible la aceleración del robot anterior. Estos datos se utilizan en un entorno feedforward, extendiendo de esta forma la funcionalidad **ACC** a **CACC**. Como ésta es la única modificación respecto al sistema **ACC**, las modificaciones necesarias a añadir al sistema **CACC** únicamente estarán relacionadas con dicho filtro feedforward.

Como ya se apuntó en el apartado 4.5, es necesario conocer el modelo del robot para obtener el filtro feedforward. Así a través de las funciones de transferencia en tiempo continuo 4.5 y en tiempo discreto 4.6, conjuntamente con la ecuación 3.29 de obtención del filtro feedforward, se obtiene las funciones de transferencia de dicho filtro tanto en tiempo continuo (ver ecuación 4.9), como en tiempo discreto (ver 4.10).

$$F_i(s) = \frac{(s + 4,094)}{4,159(s + \frac{1}{h_{d,i}})} \quad (4.9)$$

$$F_i(z) = \frac{0,2404z - 0,1452}{z - 0,9355} \text{ si } h_{d,i} = 1,5s \quad (4.10)$$

Por otra parte, recordamos que es necesario modelar las imperfecciones introducidas por el uso de la red inalámbrica, para ello nos valemos del bloque de communication delay.

Por último, en cuanto al estudio de la estabilidad de cadena del sistema **CACC**, se conserva la aproximación numérica de la figura 3.16, dependiente tanto del ancho de banda del controlador $\omega_{c,i}$ como del retardo constante de la red ϕ_i .

4.9 Validación sistema CACC mediante MATLAB/Simulink

En el presente apartado, se comprueba si el valor de $h_{d,i,min}$ obtenido a través de la aproximación numérica mencionada con anterioridad, sigue siendo válido para el caso en el que el convoy está formado por 3 robots P3DX en vez de 3 vehículos.

Se procede a comprobar el correcto funcionamiento del sistema bajo la situación que hacía estable al sistema **CACC** en el caso de un convoy de 3 vehículos, esto es, un ancho de banda del controlador $\omega_{c,i} = 0,5$, un $h_{d,i} = 1,5s$ y un retardo en la red inalámbrica del doble del tiempo de muestreo del microprocesador $\theta_i = 0,2$. Dicha comprobación se realiza tanto para el sistema en tiempo continuo, como para el sistema en tiempo discreto.

En tiempo continuo, se emplean los parámetros que se muestran en la 4.5 y el filtro feedforward 4.9 con $h_{d,i} = 1,5s$. Los resultados de velocidad, aceleración y posición relativa se muestran en las figuras 4.24, 4.25 y 4.26 respectivamente.

En tiempo discreto, se emplean los parámetros que se muestran en la 4.6 y el filtro feedforward de la ecuación 4.10. Los resultados se muestran en las figuras 4.27, 4.28 y 4.29 respectivamente.

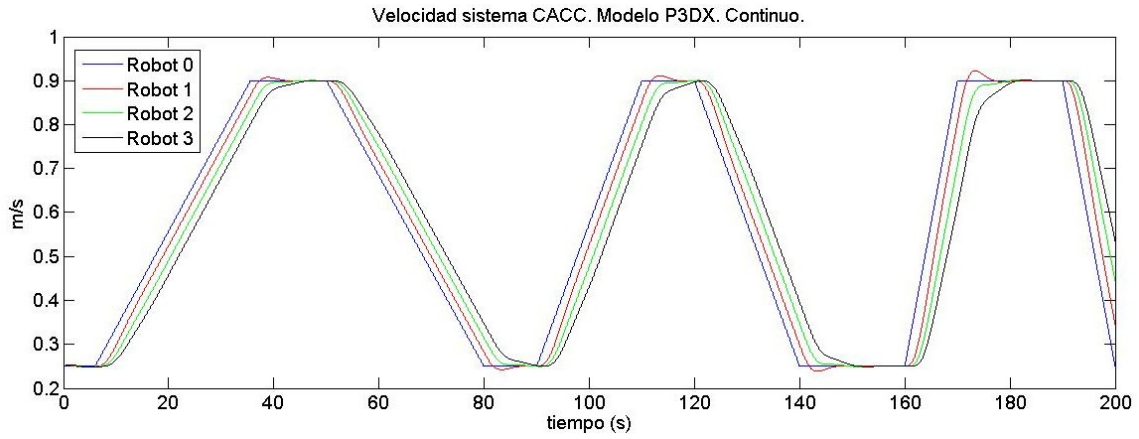
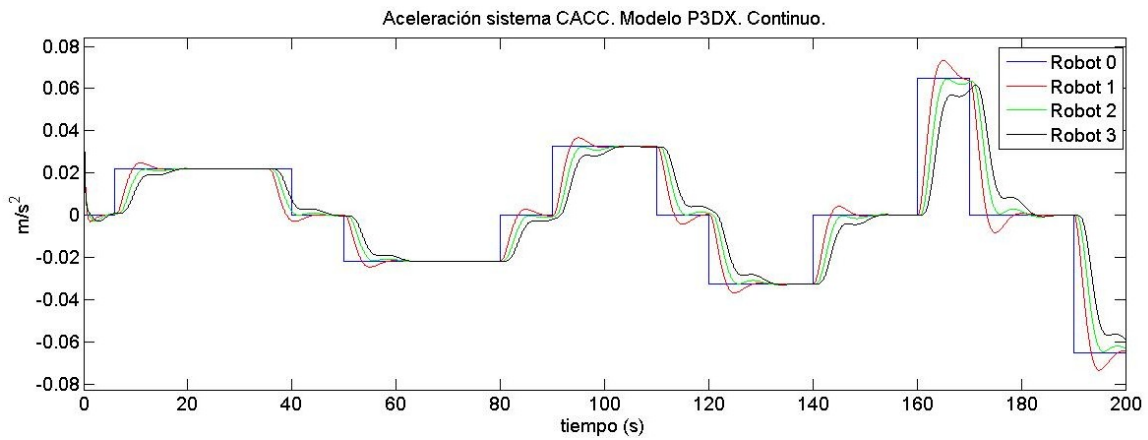
En ambos casos la curva de velocidad del vehículo de referencia 0 es la misma que en el apartado 4.6. Los resultados son satisfactorios, y las diferencias entre el sistema de control continuo y discreto son mínimas. Se observa como en el caso discreto la respuesta está menos amortiguada, pero aún así sigue siendo estable.

Tabla 4.5: Parámetros cadena de P3DX. Sistema CACC. Tráfico homogéneo. Tiempo continuo.

Robot i	$\omega_{c,i}$	$h_{d,i}$	θ_i
1	0.5	1.5	-
2	0.5	1.5	0.2
3	0.5	1.5	0.2

Tabla 4.6: Parámetros cadena de P3DX. Sistema CACC. Tráfico homogéneo. Tiempo discreto.

Robot i	$\omega_{c,i}$	$h_{d,i}$	T	θ_i
1	0.5	1.5	0.1	-
2	0.5	1.5	0.1	0.2
3	0.5	1.5	0.1	0.2

Figura 4.24: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Caso continuo.Figura 4.25: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Caso continuo.

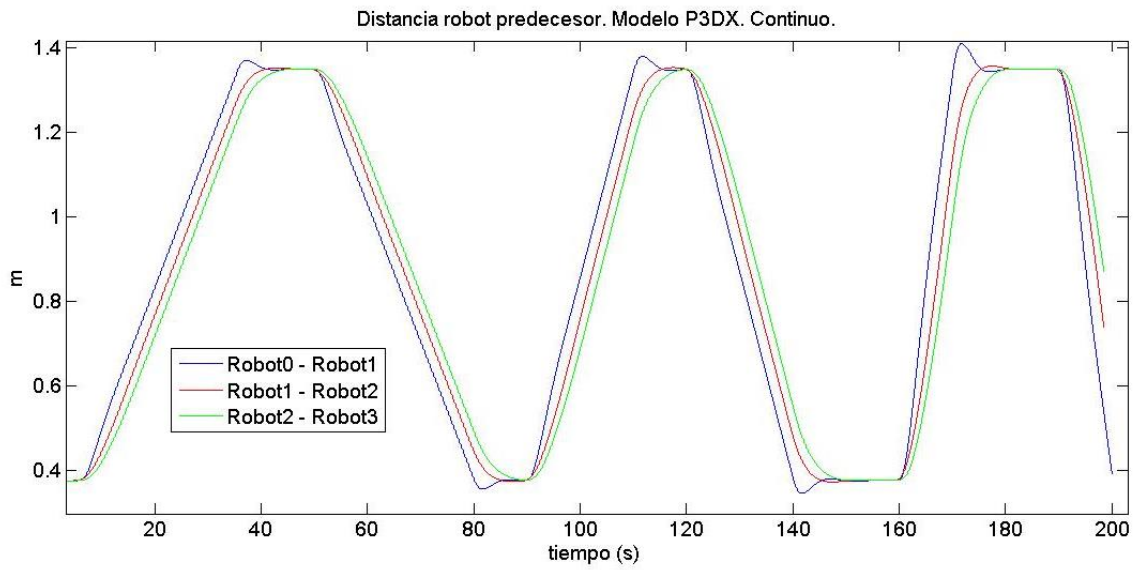


Figura 4.26: Resultados de simulación de posición relativa para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Caso continuo.

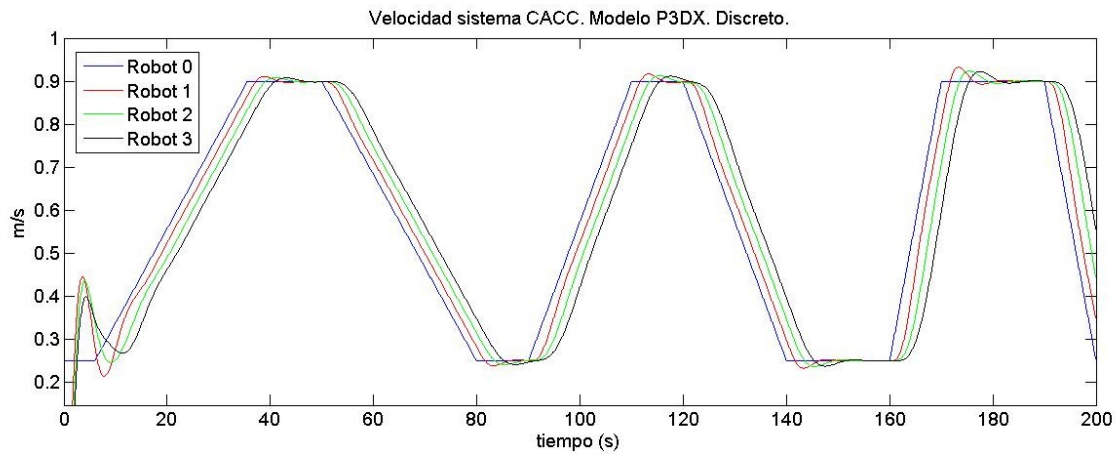


Figura 4.27: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Caso discreto.

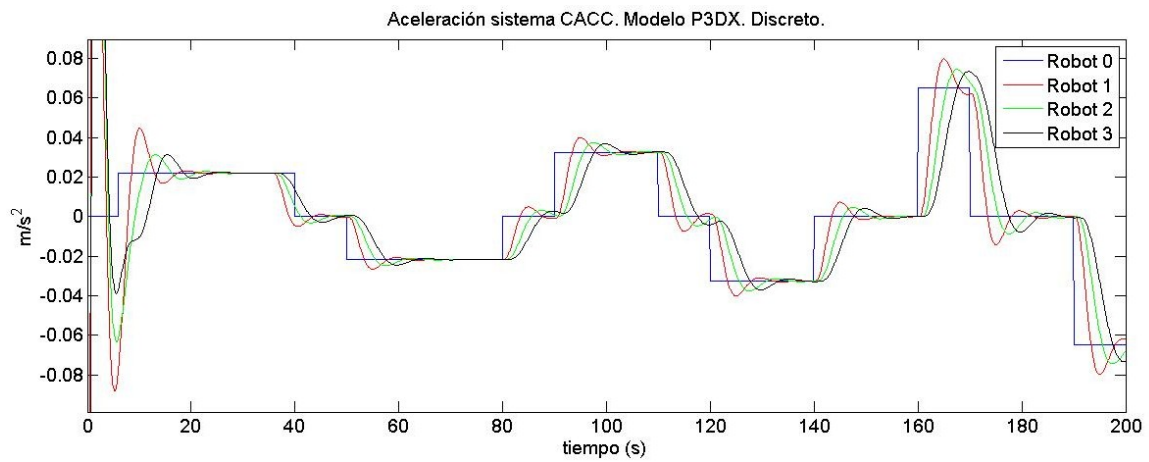


Figura 4.28: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5\text{s}$. Caso discreto.

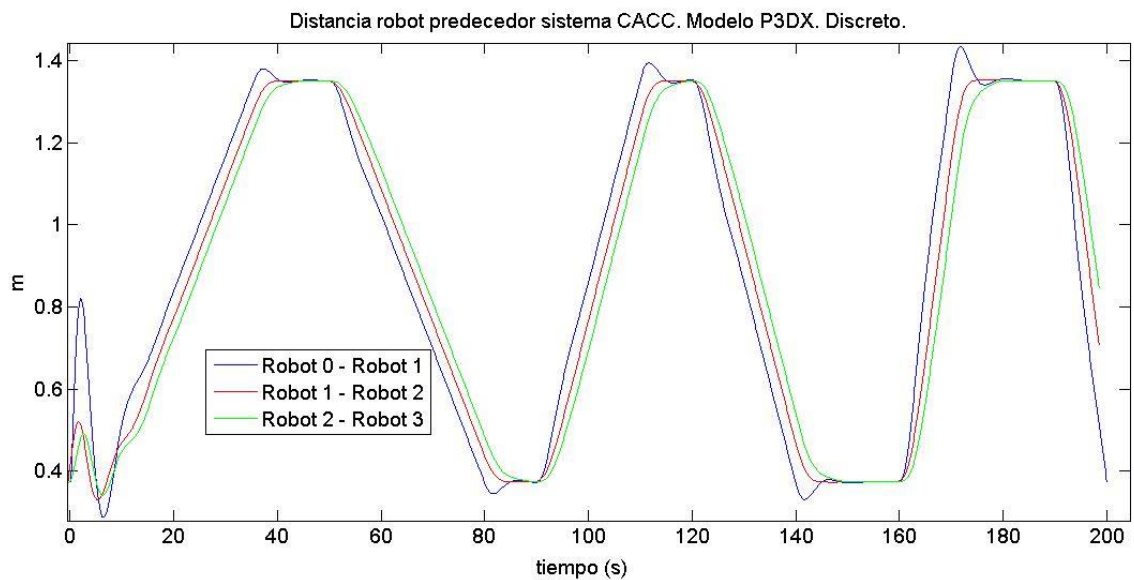


Figura 4.29: Resultados de simulación de posición relativa para una cadena de tres robots P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5\text{s}$. Caso discreto.

4.10 Validación sistema CACC mediante Player Stage

En el presente apartado se procede a la extensión del sistema ACC visto en 4.7 al sistema CACC para su validación a través de Player Stage. El sistema CACC se trata de la evolución del sistema ACC con empleo de red inalámbrica para disponer de la aceleración del robot predecesor en un entorno feedforward.

4.10.1 Configuración

En este caso, se procede a la variación del archivo de configuración de Player debido al uso de la red inalámbrica. Concretamente, será necesario un total de 3 ordenadores; en uno de ellos se llevará a cabo la simulación del mundo y la ejecución de la aplicación cliente del robot leader; los otros dos se conectarán vía inalámbrica a éste primero a fin de observar el efecto de red sobre el controlador planteado. En la figura 4.30 se muestra un esquema de la configuración llevada a cabo.

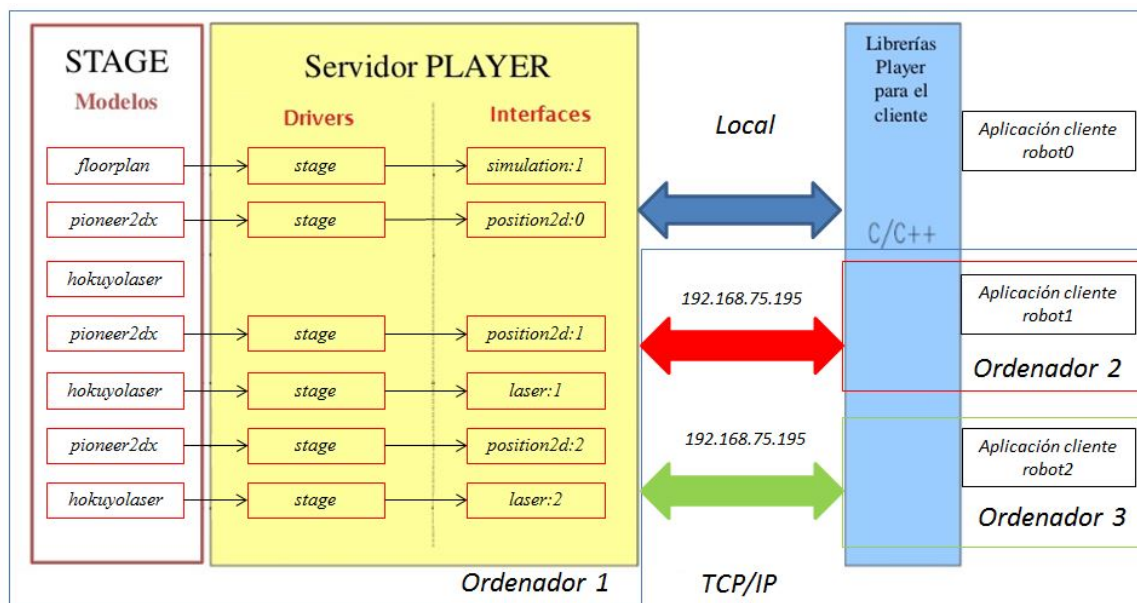


Figura 4.30: Esquema configuración simulación sistema CACC.

4.10.2 Aplicaciones cliente y validación

Es necesario realizar cambios en las distintas aplicaciones cliente desarrolladas previamente:

La aplicación cliente del primer robot de la cadena se mantiene exactamente igual, sólo que varía su matriz de distancia frontal al robot de referencia al ser $h_{d,i} = 1,5s$. Recordamos que el primer robot de nuestra cadena consta de un sistema ACC siguiendo la curva de velocidad del apartado 4.6. El hecho de tener un “head time” para el cual el sistema es inestable hará que las curvas resultantes tengan un determinado sobreimpulso. El diagrama de flujo de dicha aplicación es el mismo que se muestra en la figura 4.15.

A las aplicaciones cliente de los otros dos robots debe añadirse tanto el filtro feedforward, como la comunicación inalámbrica con el ordenador donde se lleva a cabo la simulación. Cada una de las aplicaciones tendrá un total de dos clientes distintos: uno para la funcionalidad CACC, donde se suscribirá el *position2d* y el *laser* correspondiente; y otro que se suscribirá al *position2d* del robot predecesor para

obtener su velocidad, y a partir de ésta la aceleración necesaria como entrada del filtro feedforward. Las nuevas funciones a añadir son las que se detallan a continuación:

- Cálculo de la aceleración del vehículo predecesor a través de su velocidad mediante la función *der_CACC1*:

```
//Obtención de señal de aceleración del robot predecesor a partir de su velocidad

double der_CACC1 (double vel_robot1, double dt)
{
    static double pre_vel= 0;
    double derivative;
    derivative= (vel_robot1 -pre_vel)/dt;

    //Update error
    pre_vel= vel_robot1;

    return derivative;
}
```

- Filtro feedforward de la ecuación 4.9 con $h_{d,i} = 1,5s$, cuya entrada será la aceleración calculada en el punto anterior, y cuya salida se sumará a la salida de nuestro controlador PD a fin de hacer el sistema estable con un “head time” inferior.

```
//Filtro feedforward

double feedforward (double acel0, double dt)
{
    static double pre_acel=0;
    static double pre_output=0;
    double output;
    double derivative_acel;

    derivative_acel=(acel0-pre_acel)/dt;

    output=(derivative_acel+4.094*acel0+(4.159/dt)*pre_output)/(2.7727+(4.159/dt));

    pre_acel=acel0;
    pre_output=output;

    return output;
}
```

En las figuras 4.31 y 4.32 se muestran los diagramas de flujo correspondiente a la aplicación cliente robot1 y robot2 respectivamente. Notar como la única diferencia entre ambos radica en las direcciones a las que se subscriben.

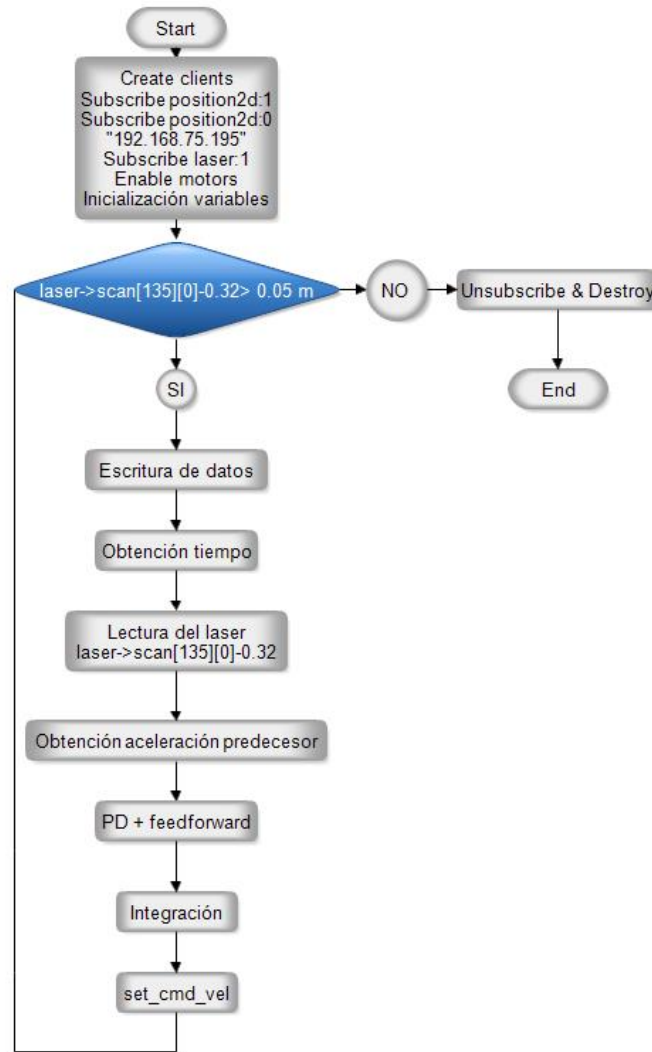


Figura 4.31: Diagrama aplicación cliente robot1 simulación sistema CACC.

Así, los resultados obtenidos en el proceso de verificación con un $\omega_{c,i} = 0,5$ y un $h_{d,i} = 1,5s$ son los que se muestran en las figuras 4.33, 4.34 y 4.35. Notar como en este caso no es posible elegir un determinado tiempo de retardo. Estos variará y vendrá directamente impuesto en el uso de la propia red inalámbrica.

Como ya se mencionó al principio del presente apartado, se observa un sobreimpulso en la curva del leader. Además en algunas de las curvas se observa como hay momentos donde la amplitud de un robot posterior en la cadena supera el valor de su predecesor. A fin de determinar si esto se debe a que el sistema es inestable o a ruido en la medida, se procede a la realización de una simulación de mayor duración para observar la progresión del sistema. Los resultados se muestran en las figuras 4.36, 4.37 y 4.38. Con las mismas se demuestra la estabilidad del sistema con un $h_{d,i} = 1,5s$, y por tanto la validación para su empleo en la parte experimental del proyecto.

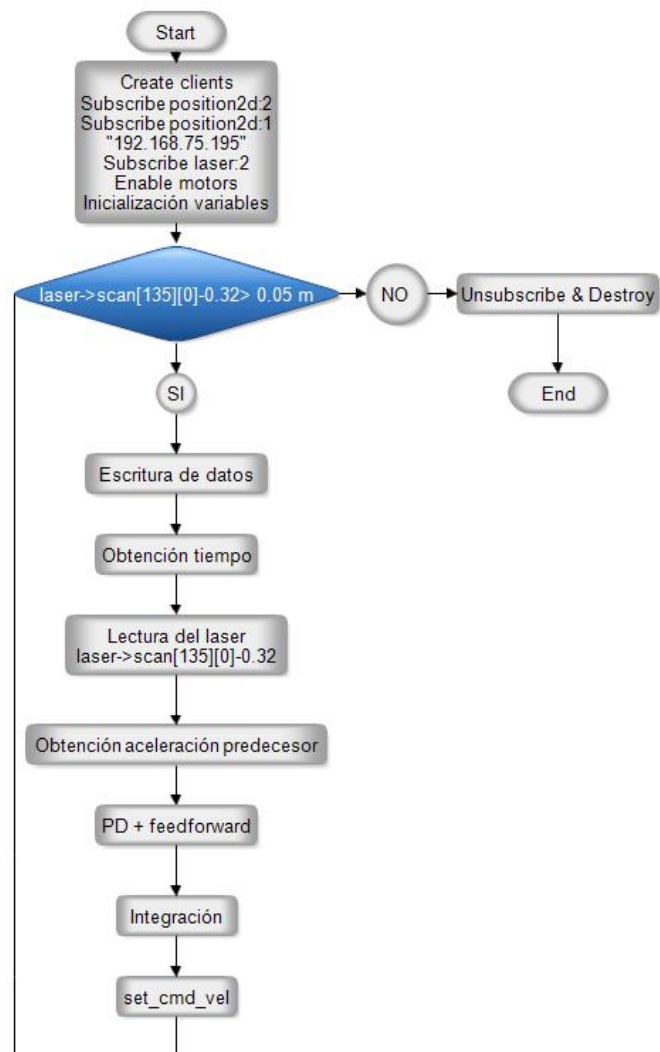


Figura 4.32: Diagrama aplicación cliente robot2 simulación sistema CACC.

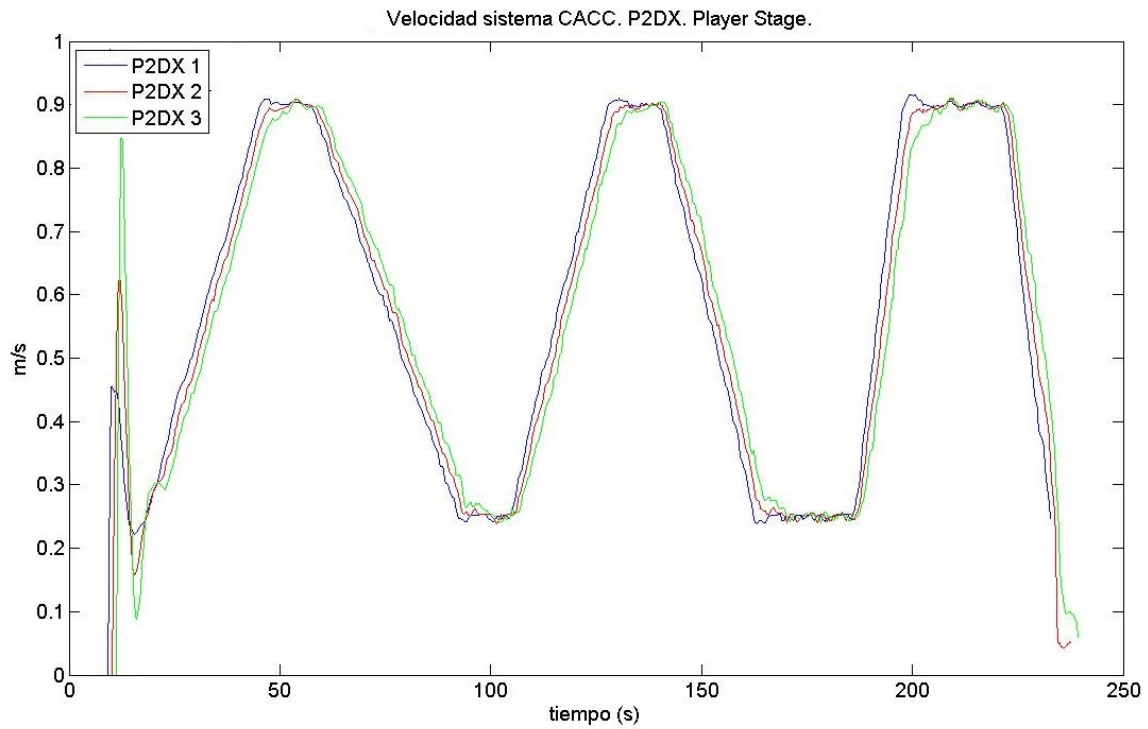


Figura 4.33: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage.

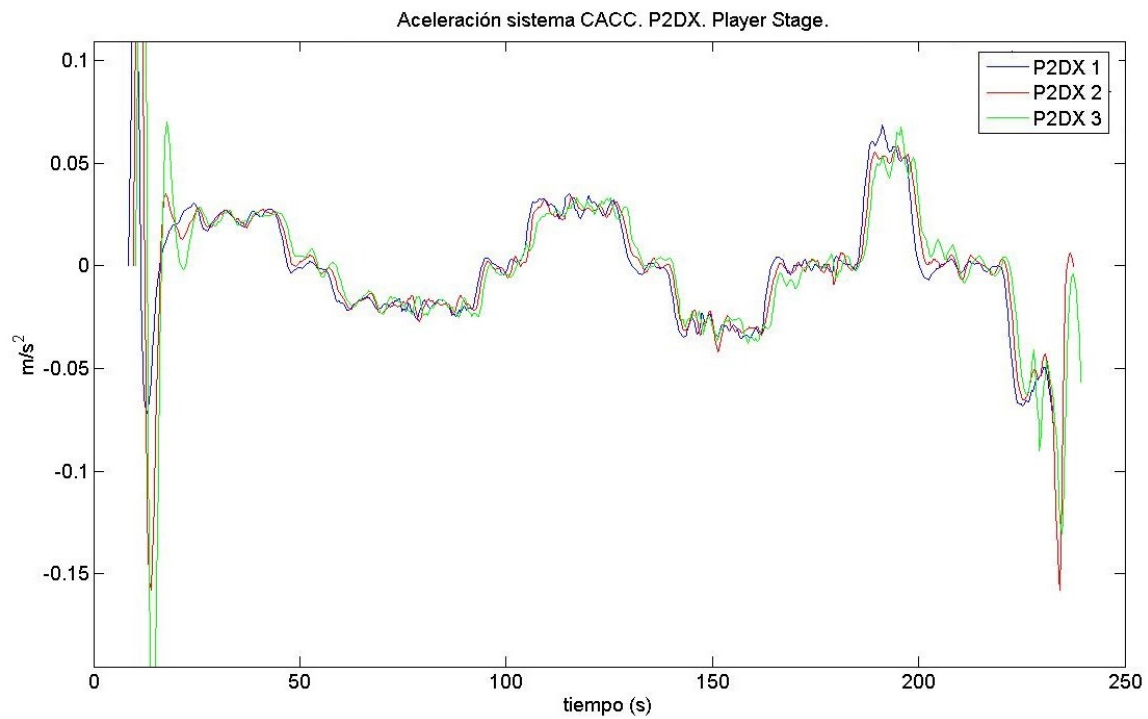


Figura 4.34: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage.

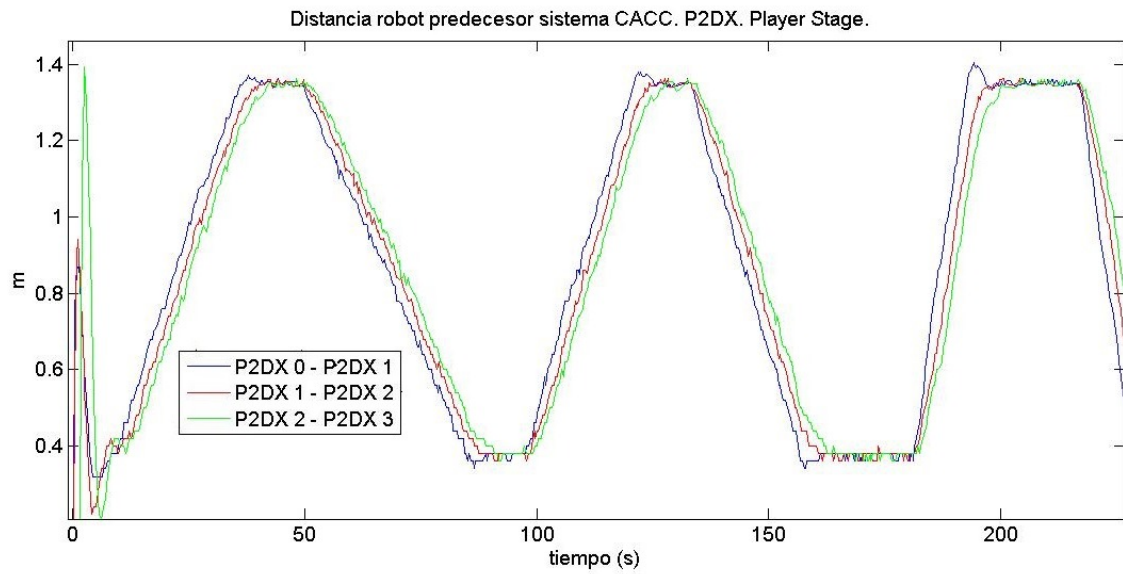


Figura 4.35: Resultados de simulación de posición relativa para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage.

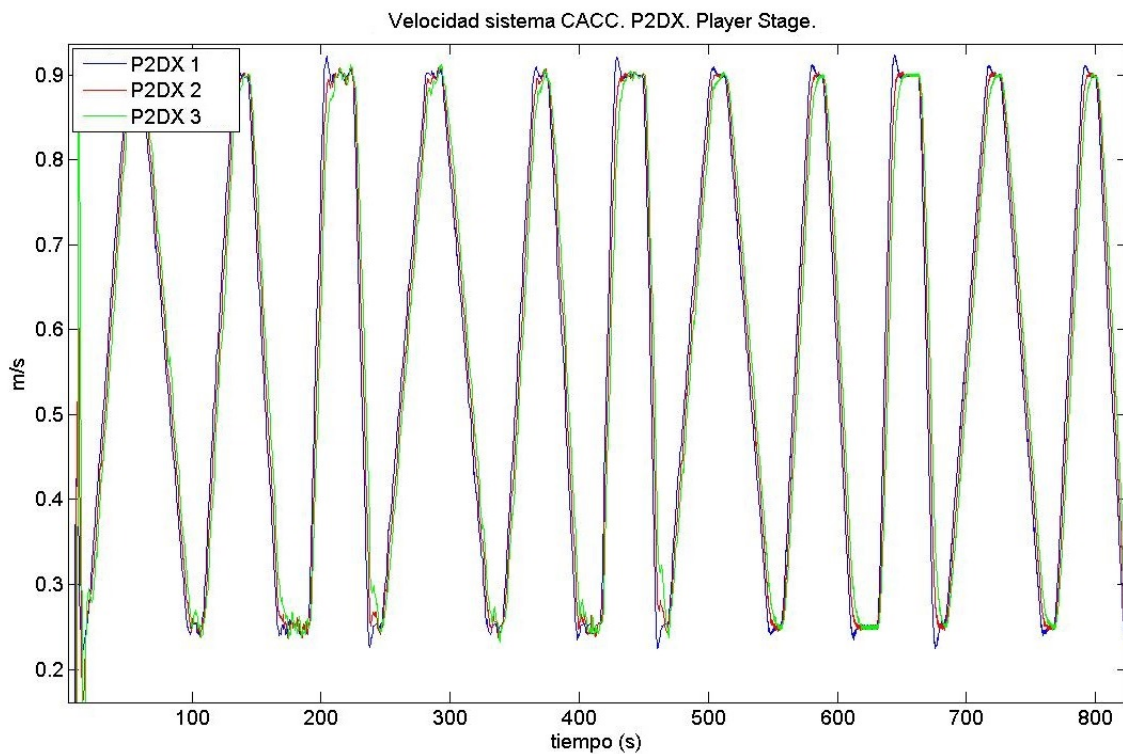


Figura 4.36: Resultados de simulación de velocidad para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage. Simulación 850 s.

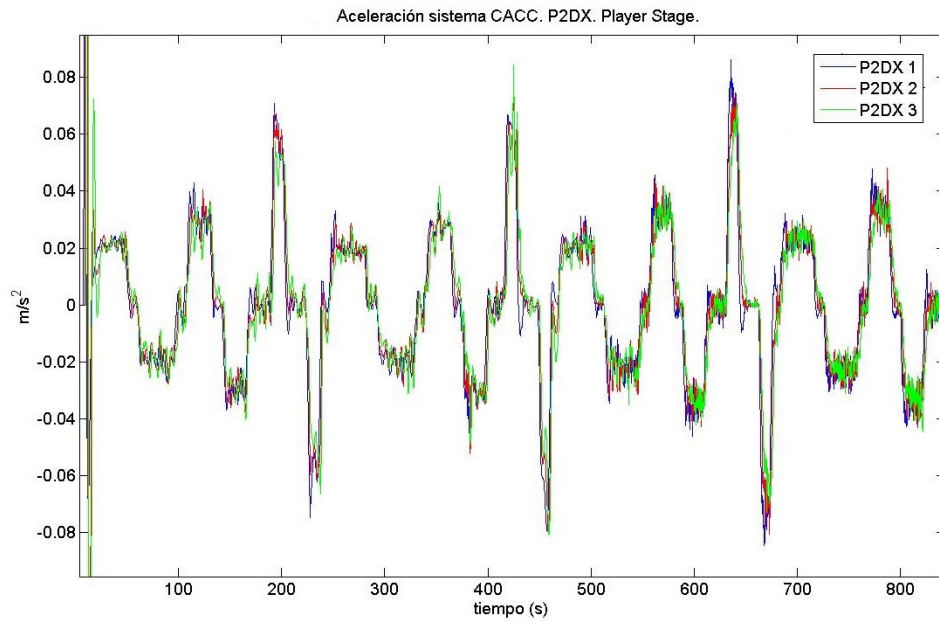


Figura 4.37: Resultados de simulación de aceleración para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage. Simulación 850 s.

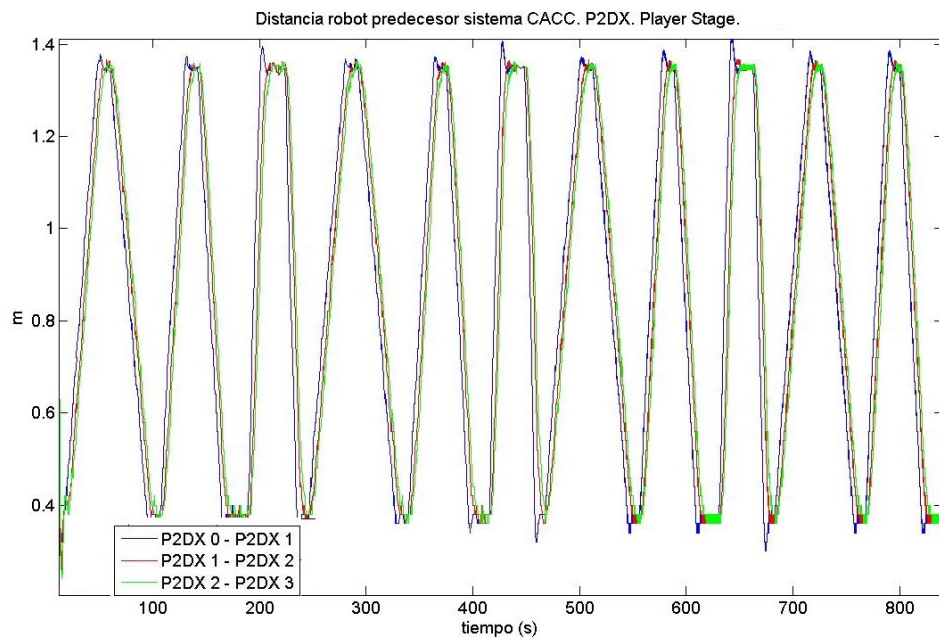


Figura 4.38: Resultados de simulación de posición relativa para una cadena de tres robots P2DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$. Player Stage. Simulación 850 s.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Introducción

En el presente capítulo se comprueba si los resultados obtenidos en el capítulo anterior son similares a los que se obtienen en la realidad. En este caso, las condiciones difieren de las simuladas tanto en MATLAB como en Player Stage. No disponemos ni de una cadena formada únicamente por robots P3-DX, ni sólo por robots P2-DX. En este caso, se empleará una cadena formada por 2 robots P3-AT y un P3-DX; así estaremos ante una situación aún más realista, la de tráfico heterogéneo. Se pasa a comprobar si aún con robots distintos entre sí la estabilidad de cadena se cumple para el mismo valor de “head time”.

En el apartado 5.2 se detallarán todos los elementos necesarios para la consecución de las pruebas.

En 5.3 se remarcan ciertos aspectos reales que no se tuvieron en cuenta previamente y que harán necesaria la ligera modificación del algoritmo. Además, también será necesario la modificación de los archivos de configuración de Player, al no disponer de un mundo en simulación.

Por último, a través de los resultados no sólo se comprobará el correcto funcionamiento de los sistemas, sino que también servirá como base de comparación entre ambos.

5.2 Entorno experimental

Ya ha sido mencionado, que la cadena está formada por un total de 3 robots. El leader de la misma es un P3-AT (ver figura 5.1), seguido de otro robot idéntico (ver figura 5.2), para terminar con un P3-DX (ver figura 5.3).

Cada uno de estos robots a su vez va a necesitar un ordenador para poder ejecutar las distintas aplicaciones clientes desarrolladas. Además, tanto el segundo como el tercer robot de la cadena necesita de un láser Hokuyo URG-04LX para la obtención de la distancia al robot predecesor. Recordamos que el leader de la cadena no necesita láser, ya que sigue a un vehículo de referencia a través de una matriz con valores de distancia frontal.

Debido a las distintas alturas de los robots y a fin de tener una superficie donde pueda impactar el láser para la obtención de la distancia relativa, tanto el primer como el segundo robot de la cadena disponen de cajas en su superficie.

Por otra parte, tampoco disponemos de un archivo .world, sino que las pruebas hay que realizarlas en un pasillo real. Para ello se escoge el pasillo situado al lado del laboratorio DO202 en la Escuela Politécnica

de la Universidad de Alcalá. El mismo se considera suficientemente largo y cercano a la red inalámbrica a emplear. No obstante, aún siendo de los más largos habrá que adaptar la curva de velocidad a seguir por el leader. En la figura 5.4 se muestra una fotografía del pasillo donde se realizarán las distintas pruebas.

Por último, en la figura 5.5 se observa la formación de la cadena entre los tres robots, cada uno de ellos con su ordenador, y el segundo y el tercero además con láser.



Figura 5.1: Robot Pioneer P3-AT. Leader de la cadena.



Figura 5.2: Robot Pioneer P3-AT. Segundo robot de la cadena.



Figura 5.3: Robot Pioneer P3-DX. Tercer y último robot de la cadena.



Figura 5.4: Pasillo al lado del laboratorio de investigación DO202 de la Escuela Politécnica de la Universidad de Alcalá.



Figura 5.5: Cadena formada por 3 robots para la realización de las pruebas experimentales pertinentes.

5.3 Modificaciones

La primera de las modificaciones a realizar sobre todos los archivos necesarios para la ejecución de los sistemas [ACC](#) y [CACC](#) en Player, pasa por la modificación de los archivos de configuración con extensión .cfg. Concretamente, esto se debe a la necesidad de cambio a drivers reales en vez de utilizar los propios del simulador Stage.

Si se compara el esquema del archivo de configuración para el sistema [ACC](#) en real (ver figura 5.6) con el del apartado anterior, las diferencias son notables. En primer lugar, ya no podemos utilizar un único ordenador para ejecutar todas las aplicaciones clientes, sino que será necesario emplear un total de 3 ordenadores, uno por robot. La conexión del robot y el ordenador correspondiente se realizará de forma local. El otro aspecto diferenciador, recae en el empleo de drivers para el manejo de hardware real: *p2os* y *hokuyo_aist*. Por último, a lo que archivos de configuración se refiere, notar en la figura 5.7 que el archivo de configuración para el sistema [CACC](#) es exactamente el mismo. La única diferencia radica en la necesidad de suscribirse a través de la red inalámbrica al robot predecesor. Esto sólo afectará a las aplicaciones cliente. En este caso, habrá una conexión local con el robot que controla y una conexión inalámbrica con su predecesor.

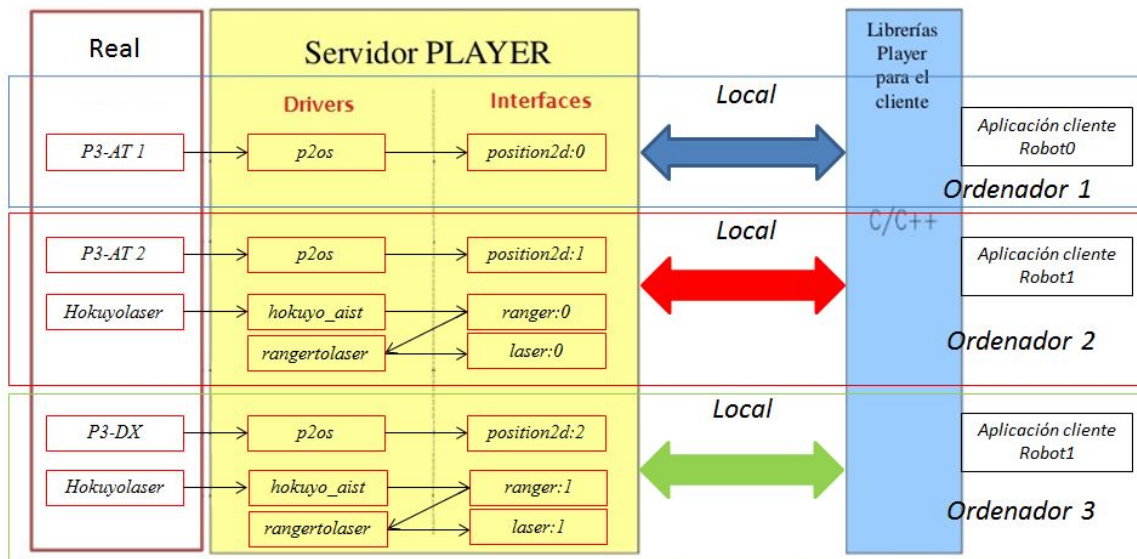


Figura 5.6: Esquema configuración sistema ACC. Prueba real.

p2os nos permite comunicarnos con el microcontrolador que cualquier robot de la familia Pioneer tiene. Así, se podrá medir la velocidad del robot a través de la interfaz *position2d* que el driver proporciona. Se necesitará un total de 3, uno para cada uno de los robots que forman la cadena.

El empleo de este driver para la obtención de la velocidad presenta un problema importante. El problema está en la medida que se recibe, que difiere de la que realmente lleva el robot. Para una mejor comprensión de lo ocurrido, se han comandado distintos escalones de velocidad comprobándose cuál es la medida que devuelve el driver *position2d*. En la figura 5.8 se muestra el valor comandado frente al valor medido. De dicha figura, se puede deducir que en la mayoría de los casos se produce una sobrestimación de la velocidad, y que la misma aumenta a medida que lo hace la velocidad comandada. De esta forma, si esto es cierto y sigue alguna expresión matemática, la corrección de este error resultará sencilla.

Se procede al modelado del error odométrico en velocidad en función de la velocidad comandada a través de una función de segundo grado. Para ello se toman medidas a distintas velocidades y en tiempos distintos. En la figura 5.9, se observa como el modelado del error resulta impredecible. Se aprecia una clara

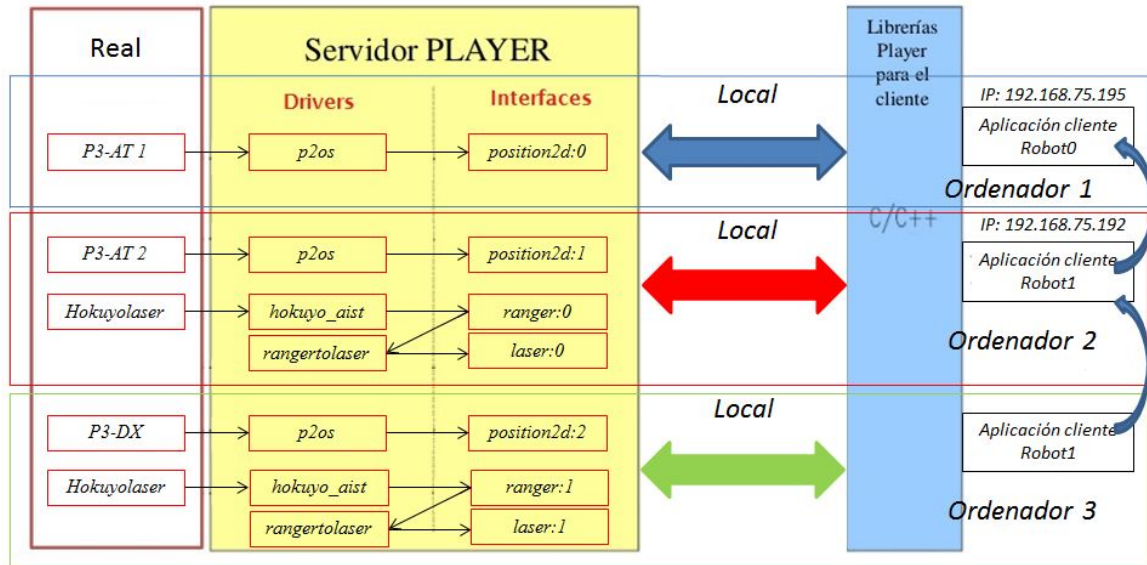


Figura 5.7: Esquema configuración sistema CACC. Prueba real.

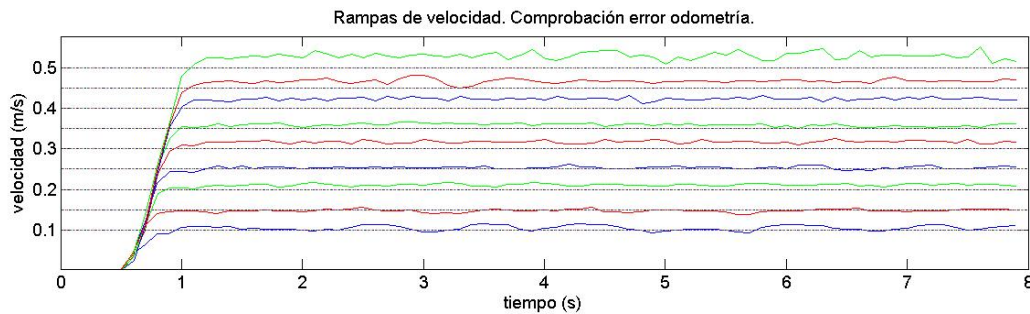


Figura 5.8: Rampas de velocidad. Comprobación error en la medida de velocidad.

diferencia entre las medidas que se han tomado en un tiempo (arriba), y las medidas que se han tomado en un tiempo posterior (abajo). Por tanto, ante la aleatoriedad del error en la medida de velocidad, sólo quedará soportarlo y analizar como el mismo afecta al sistema de control.

El driver *hokuyo_aist* permite la comunicación con el láser Hokuyo URG-04LX a través de la interfaz *ranger*. Dicha interfaz se emplea como entrada en el driver *rangertolaser* para obtener las medidas necesarias en la interfaz *laser*. La obtención de los datos necesarios para la lectura de la distancia al robot predecesor a través de un driver distinto, varía la forma de acceso a dicha información: *laser* → *ranges*[341].

Por otra parte, el empleo del driver *hokuyo_aist* presenta varios problemas. El primero de ellos se refiere a las medidas iniciales del láser, las mismas pueden ser nulas, sin que esto sea cierto. Para solucionarlo, posterior a la subscripción en las aplicaciones cliente *robot1* y *robot2*, se procede a una lectura iterativa del láser hasta que la medida del mismo difiera de un valor nulo. El otro problema es aleatorio y también está relacionado con la devolución de medidas nulas erróneas, sólo que esta vez durante la ejecución de nuestro sistema de control; para su solución se evalúa el valor que devuelve de forma que si es nulo, se le asigna el valor correspondiente al producto de la velocidad lineal anterior y del "head time". A continuación, se muestra el código correspondiente a la solución de los problemas expuestos:

```
//Comprobación de recepción de medida láser
```

```

for (i=0;i<10;i++)
{
    playerc_client_read( client );
}

while (laser->ranges[341]==0)
{
    printf("bloqueado_\n");
    playerc_client_read( client );
}

```

```

//Para evitar problema de lectura del driver.

```

```

if (dist_frontal==0)
{
    dist_frontal=hd*(position2d->vx);
}

```

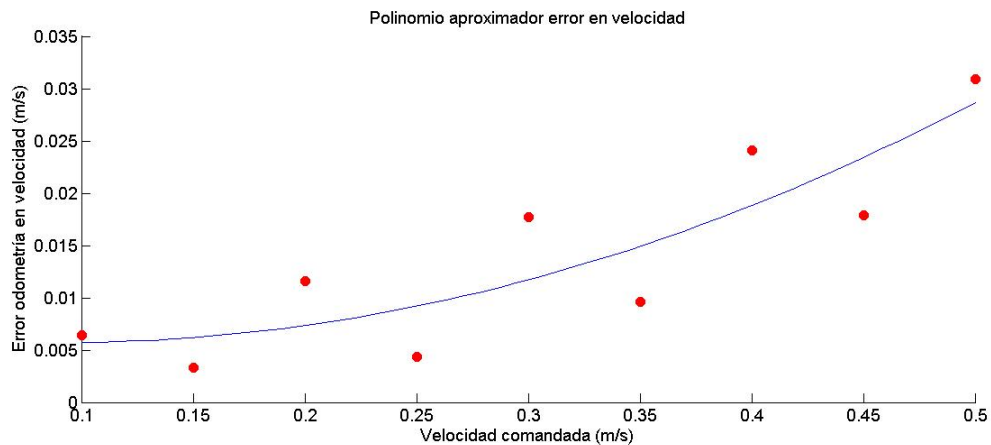


Figura 5.9: Modelado error odometría en velocidad frente velocidad comandada.

Por otra parte, otro aspecto real a tener en cuenta es el hecho de que cada uno de los robots sea capaz de ir recto, de forma que todos se mantengan en el interior de la cadena. Este problema en simulación era inexistente, pero en la realidad es bastante crítico. La resbaladricidad de suelos, la alineación de las ruedas de cada uno de los robots, así como su orientación inicial en la cadena afectarán a la trayectoria rectilínea del mismo. Por tanto, se empleará la lectura del láser en el segundo y tercer robot de la cadena, de forma que a partir de las medidas del láser y un controlador **P** se apliquen al robot distintas velocidades angulares que hagan que se centre con su predecesor. A continuación se muestra el extracto de código encargado de mantener la trayectoria del robot:

```

//Centrado con el robot predecesor mediante velocidad angular

```

```

laser_izq=0;
for (j=342;j<382;j++)
{
    laser_izq=laser_izq+(laser->ranges[j]);
}

laser_der=0;

```

```

for (h=300;h<340;h++)
{
    laser_der=laser_der+(laser->ranges[h]);
}

error=laser_der-laser_izq;
vel_angular=-0.002*error;

```

Por último, las figuras 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13 muestran como se integran las distintas modificaciones aquí descritas en las aplicaciones cliente robot1 y robot2, tanto para el sistema ACC como para el sistema CACC.

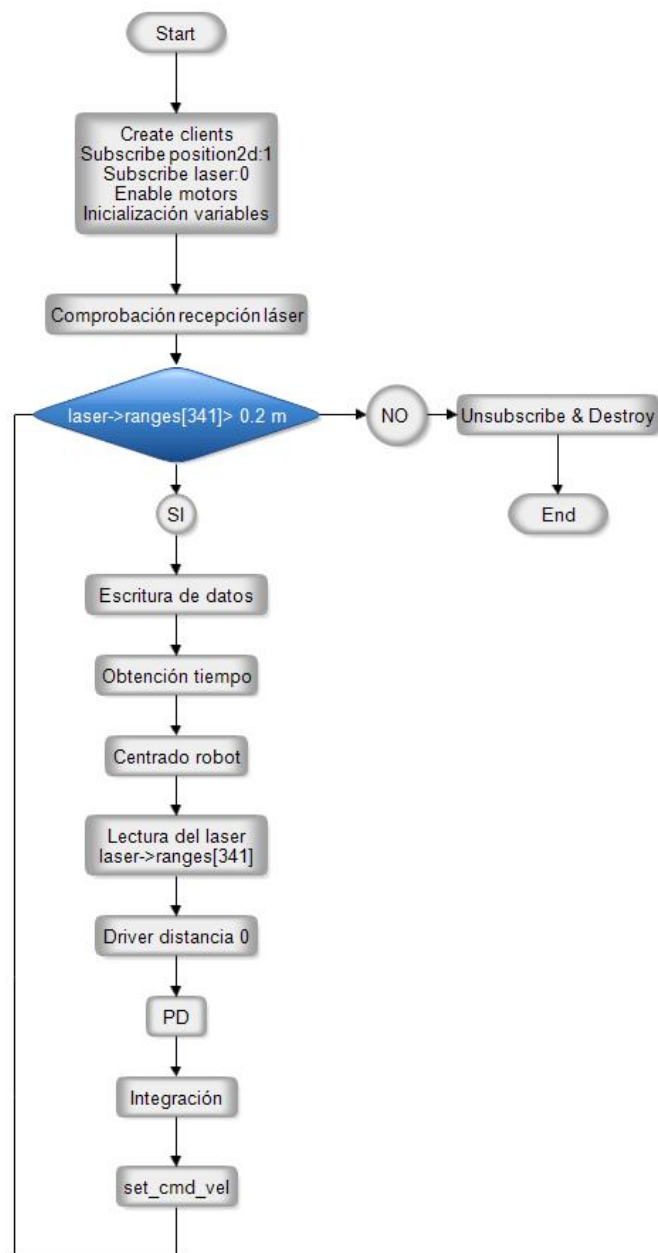


Figura 5.10: Diagrama aplicación cliente robot1 experimental sistema ACC.

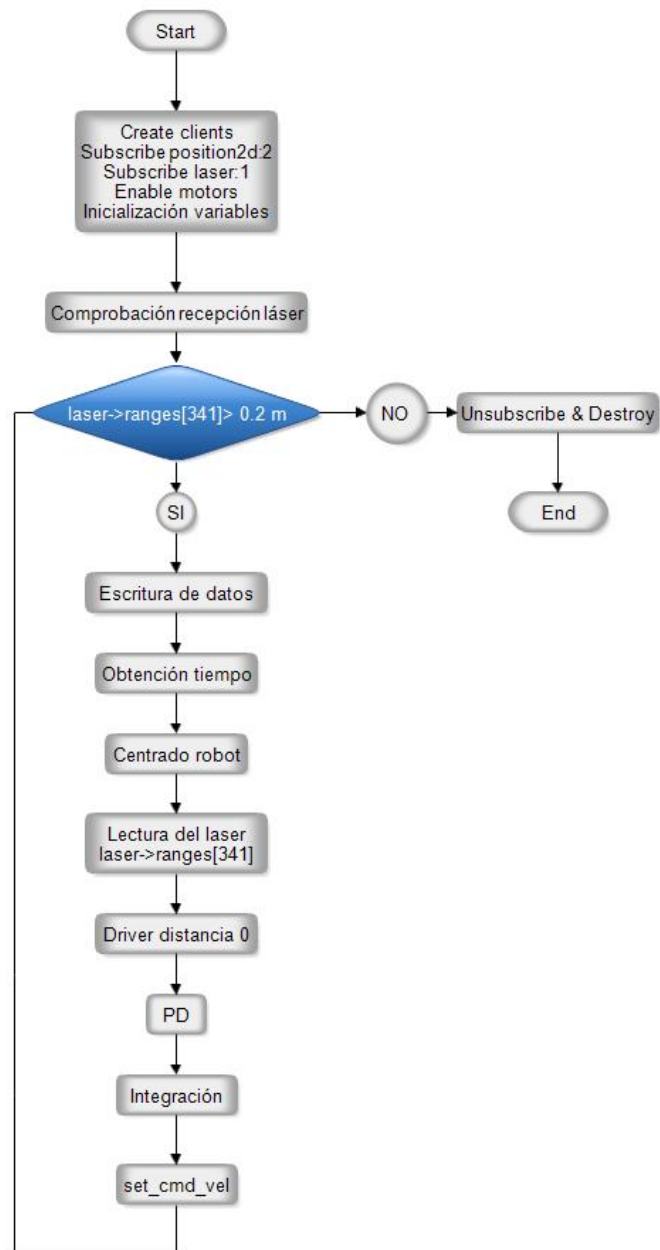


Figura 5.11: Diagrama aplicación cliente robot2 experimental sistema ACC.

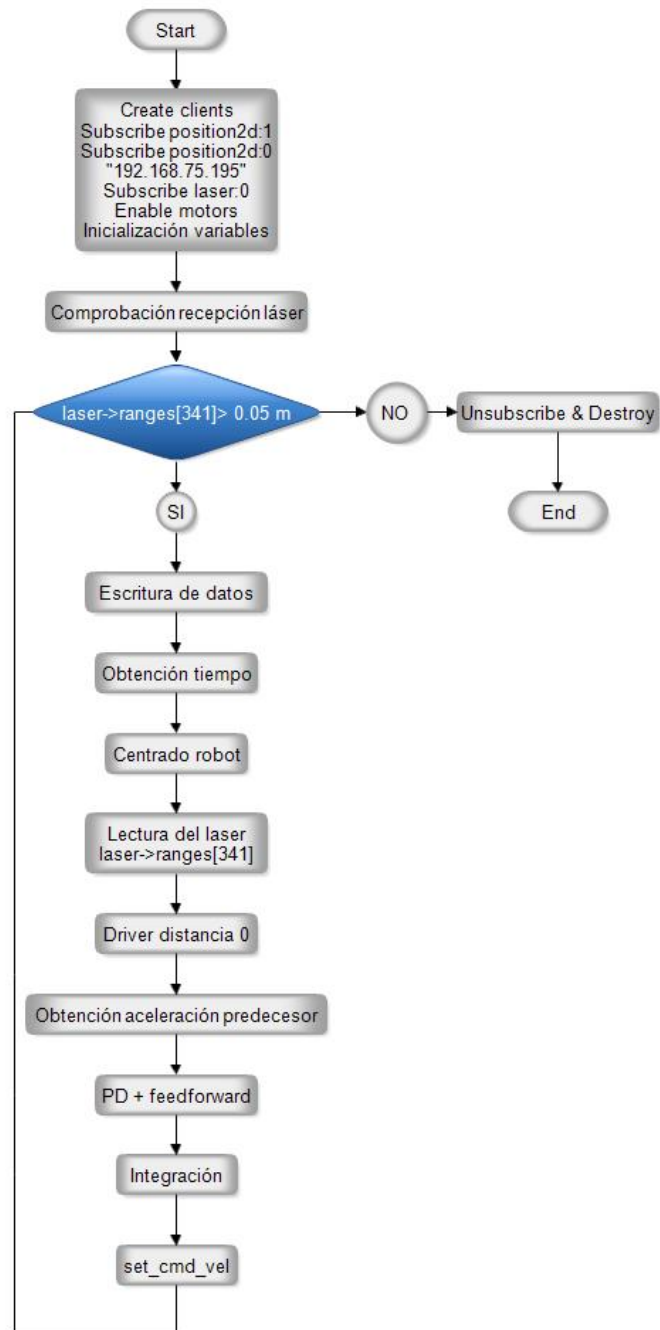


Figura 5.12: Diagrama aplicación cliente robot1 experimental sistema CACC.

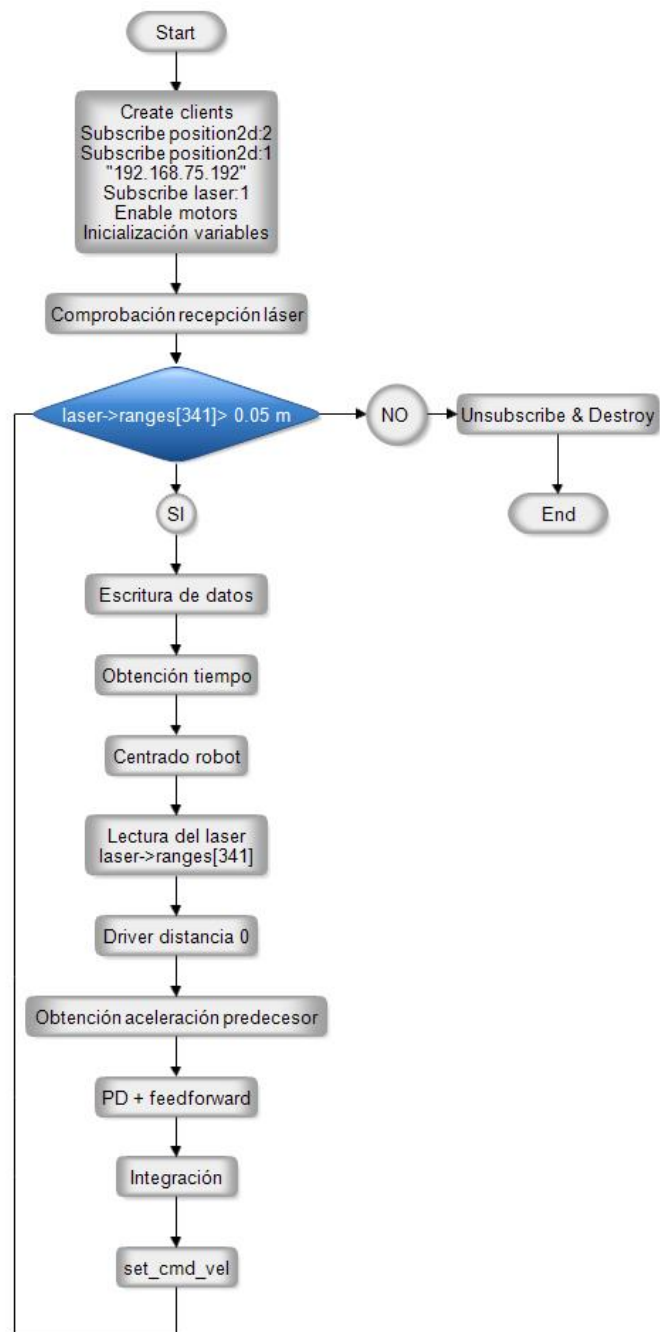


Figura 5.13: Diagrama aplicación cliente robot2 experimental sistema CACC.

Tabla 5.1: Parámetros resultados experimentales sistema ACC.

Robot i	$\omega_{c,i}$	$h_{d,i}$	K_p	K_d
1	0.5	3	0.5	0.125
2	0.5	3	0.5	0.125
3	0.5	3	0.5	0.125

5.4 Resultados sistema ACC

Los resultados que se muestran en este apartado, corresponden a una curva de velocidad distinta. Este hecho se debe a la necesidad de adaptación de la curva de velocidad para que sea posible la realización de las pruebas experimentales en el pasillo descrito en 5.2. La curva es más lenta: El robot de referencia tomado por el leader de la cadena llevará una velocidad de $0,1m/s$ durante $20s$; después acelerará durante $20s$ hasta alcanzar $0,4m/s$. Mantendrá la velocidad durante $10s$, para volver a decelerar durante $20s$, manteniéndose de nuevo $10s$ en $0,1m/s$. Esta curva se repite hasta alcanzar un tiempo total de $120s$.

En las figuras 5.14, 5.15 y 5.16, se muestran los resultados correspondientes a los parámetros que se muestran en la tabla 5.1.

Concretamente, en la figura 5.14 se observa la curva de velocidad. Al principio de la misma existe un sobreimpulso debido a la velocidad inicial del robot, esto es, el controlador PD da un sobreimpulso en aceleración a fin de cumplir con la estrategia de espaciamiento lo antes posible. En la misma también se observa como el “head time” de $3s$ se conserva durante la aceleración del robot, pero no tanto durante su deceleración. Otro problema visible, es como a medida que avanza el índice del robot en el interior de la cadena, su velocidad disminuye (en una cadena infinita el último robot tendría velocidad nula). Ambos problemas se derivan del error en la medida de la velocidad explicado en 5.3.

Por otra parte, el error que se induce por la odometría en la velocidad es aún más notable en la distancia relativa que ve el robot. En la figura 3.14 se observa como la distancia relativa entre los distintos robots va disminuyendo ya que la velocidad que cada uno lleva es realmente inferior.

Por último, se puede concluir que pese a soportar el error en la medida de velocidad el controlador de velocidad lineal cumple su cometido, siendo estable la cadena con un $h_{d,i} = 3s$.

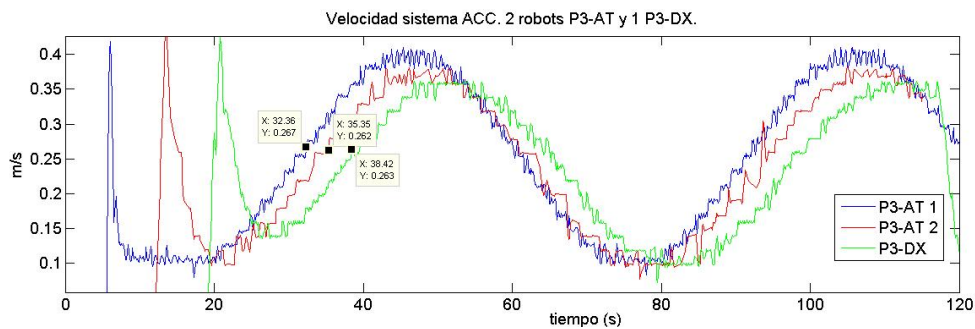


Figura 5.14: Resultados experimentales de velocidad para una cadena de tres robots: P3AT-P3AT-P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$.

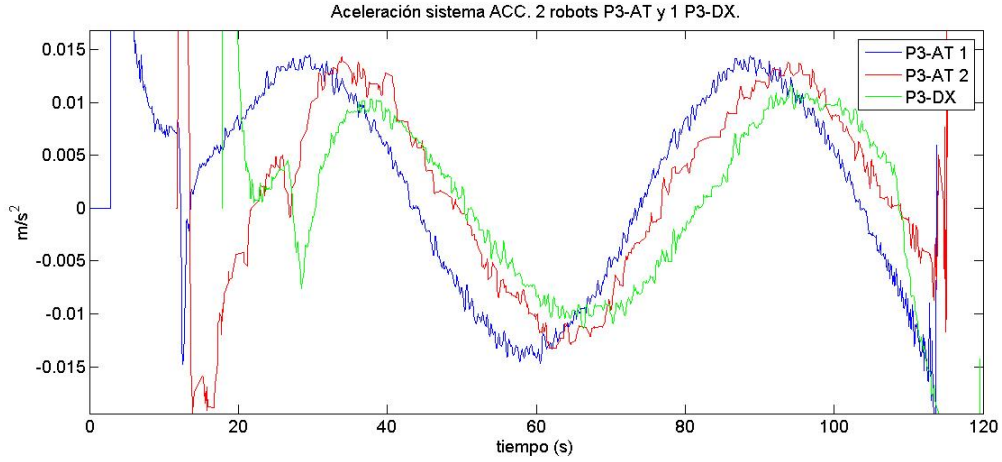


Figura 5.15: Resultados experimentales de aceleración para una cadena de tres robots: P3AT-P3AT-P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$.

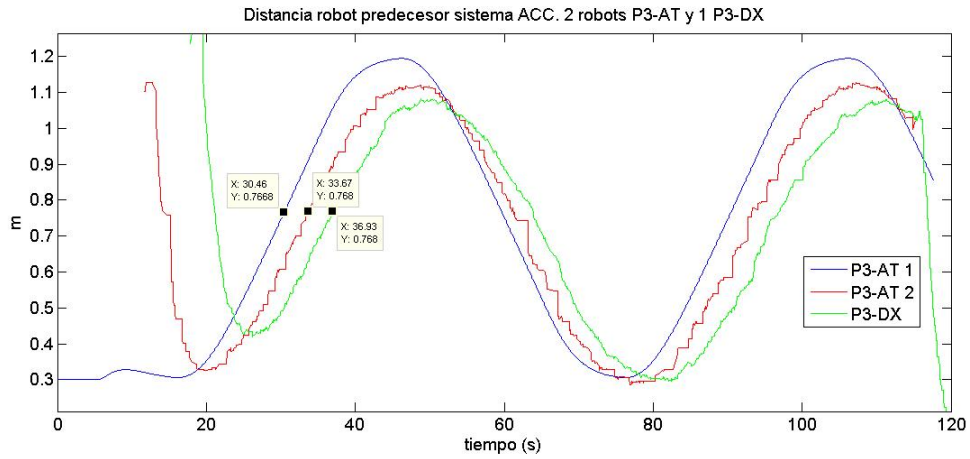


Figura 5.16: Resultados experimentales de distancia relativa para una cadena de tres robots: P3AT-P3AT-P3DX equipados con sistema ACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 3s$.

5.5 Resultados sistema CACC

En el presente apartado se procede a la comparación de los resultados experimentales del sistema ACC del apartado 5.4 con los del sistema CACC. Recordamos que el sistema CACC se trata de una extensión del sistema ACC con red inalámbrica para el empleo de la aceleración del robot predecesor en un entorno feedforward, a fin de alcanzar la estabilidad de cadena pese a un menor “head time”.

En las figuras 5.17, 5.18 y 5.19 se muestran los resultados correspondientes a los parámetros de la tabla 5.2. En dicha tabla, notar como el retardo vendrá impuesto por la propia red, pudiendo ser el mismo un valor que varíe con el tiempo.

En dichas figuras se sigue reflejando el problema existente en la medida de la velocidad, afectando de la misma forma que lo hace en el sistema ACC.

Centrándonos en la curva de velocidad que se muestra en la figura 5.17, se observa como el “head time” es 1,5s durante el proceso de aceleración. El hecho de que el $h_{d,i} = 1,5s$ hace que la distancia relativa entre los robots sea exactamente la mitad, como se puede ver en 5.19.

Tabla 5.2: Parámetros resultados experimentales sistema CACC.

Robot i	$\omega_{c,i}$	$h_{d,i}$	K_p	K_d	θ_i
1	0.5	1.5	0.5	0.125	-
2	0.5	1.5	0.5	0.125	Variable
3	0.5	1.5	0.5	0.125	Variable

Por último, mencionar que pese al error introducido por la medida de la velocidad, el sistema CACC sigue siendo estable con un $h_{d,i} = 1,5s$, cumpliendo el objetivo de reducir el espaciamiento entre robots para la mejora del problema de congestión mediante el empleo de una red inalámbrica.

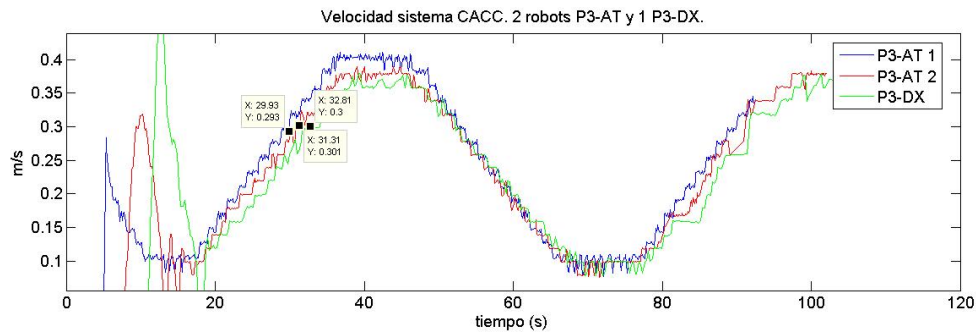


Figura 5.17: Resultados experimentales de velocidad para una cadena de tres robots: P3AT-P3AT-P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$.

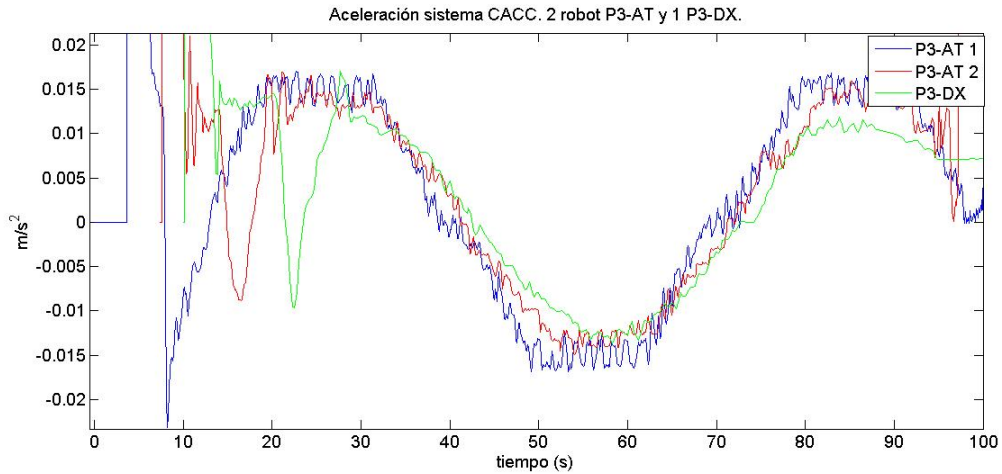


Figura 5.18: Resultados experimentales de aceleración para una cadena de tres robots: P3AT-P3AT-P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$.

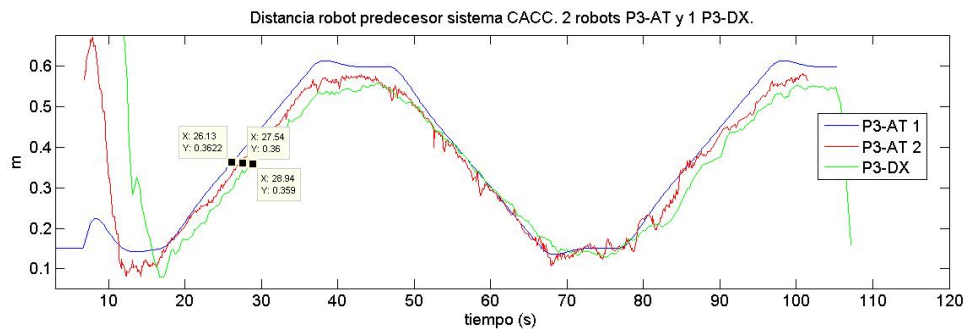


Figura 5.19: Resultados experimentales de distancia relativa para una cadena de tres robots: P3AT-P3AT-P3DX equipados con sistema CACC siguiendo un robot de referencia. Los resultados corresponden a un $h_{d,i} = 1,5s$.

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras

En este apartado se resumen las conclusiones obtenidas y se proponen futuras líneas de investigación que se derivan del trabajo.

6.1 Conclusiones

Se ha realizado un estudio generalizado de aspectos básicos del sistema de control crucero, como estabilidad de cadena, estrategia de espaciamiento, así como la estructura del controlador. Concretamente, a partir de un sistema [ACC](#) y el modelo de dinámica longitudinal de un vehículo se ha obtenido el sistema [CACC](#) correspondiente. Los resultados obtenidos en MATLAB/Simulink, se han realizado bajo distintas circunstancias: desde empleo de modelo de vehículo simplificado ($1/s^2$), hasta modelo real con retardo en los actuadores, situaciones de tráfico homogéneo, heterogéneo, con o sin retardo en la comunicación. A través de dichos resultados se establece la base de conocimiento necesaria para la adaptación del controlador a la plataforma experimental.

La modificación de los sistemas [ACC](#) y [CACC](#) para los robots Pioneer se ha realizado, en primer lugar, a través de MATLAB/Simulink. En este caso, se parte de un modelo en [VVEE](#) de un robot P3-DX y del sistema [CACC](#), obteniendo mediante la introducción de comunicación entre los distintos robots el sistema [CACC](#). Para su adaptación, han sido considerados limitaciones reales del robot, como envío de paquetes por parte del procesador, velocidades máximas permitidas, así como la elección del sensor apropiado para la aplicación (un láser). También ha sido considerado un retardo de valor constante. Los resultados obtenidos son coincidentes con los obtenidos para la cadena formada por vehículos.

Para la implementación real del controlador ha sido necesaria la traducción del sistema planteado a C. La correcta traducción se comprueba a través del empleo de la plataforma robótica Player con el simulador Stage. Para cada robot ha sido desarrollada una aplicación cliente distinta. El archivo de configuración para la conexión entre los robots varía según el sistema sea [ACC](#) o [CACC](#). En el último de los casos, se comprueba el correcto funcionamiento ante un retardo variable impuesto directamente por la red inalámbrica empleada. De esta forma, se obtienen los algoritmos en C testados, a utilizar en la cadena formada por dos robots P3-AT y un robot P3-DX mediante Player.

Se han realizado un total de dos pruebas experimentales. En ambas han sido necesaria la adaptación de los archivos de configuración para la conexión con el hardware. Además, ha sido necesario la introducción de modificaciones en el algoritmo, para evitar problemas derivados de los drivers. La primera de las pruebas, demuestra la estabilidad del sistema [ACC](#) para un $h_{d,i} = 3s$; mientras que la segunda, correspondiente al sistema [CACC](#), es estable con un $h_{d,i} = 1,5s$. Mediante estas pruebas, se pone de

manifiesto como el añadir comunicación entre vehículos al sistema [ACC](#) disminuye la distancia necesaria entre vehículos, con la consecuente mejora de la congestión.

Por último, el modelo de vehículo simplificado que ha sido la base para la obtención de las restricciones que debe cumplir el sistema en sus parámetros para asegurar la estabilidad de cadena, ha resultado válido para los robots Pioneer.

6.2 Líneas futuras

En primer lugar, será necesario realizar un estudio mucho más exhaustivo del error que introduce la odometría en la medida de la velocidad necesaria para el algoritmo. Aunque se haya demostrado el correcto funcionamiento del sistema, la correcta obtención de la medida permitirá observar el funcionamiento perfecto del sistema, sin decrementos de velocidad incrementales, a medida que avanza el índice del robot dentro de la cadena. En el caso de que el error no sea modelable, existen otras posibilidades de mejora; desde el empleo de ROS para el desarrollo de la aplicación, donde está verificado que la medida de velocidad es realmente la que lleva el robot, hasta la corrección de la medida de velocidad según la distancia leída a través del láser.

Por otra parte, otra línea de investigación sería el estudio de afección a la estabilidad de cadena de la pérdida de paquetes y la pérdida de señal. Estas dos últimas imperfecciones se modelarían a través de TrueTime. TrueTime es un simulador de MATLAB/Simulink para sistemas de control en tiempo real. Truetime facilita la cosimulación de ejecución de un sistema de control con transmisiones a través de red, siendo perfecto para el modelado de [NCS](#) [[Urban et al., 2004](#)]. Para el caso de redes inalámbricas TrueTime soporta dos protocolos: IEEE 802.11 b (WLAN) y IEEE 802.15.4 (Zigbee). En dicho proceso de verificación se determinará cual de los dos protocolos, es más óptimo para el sistema [CACC](#).

No existen resultados experimentales de afección de las imperfecciones de la red inalámbrica a la estabilidad de cadena del sistema [CACC](#) según el tipo de red inalámbrica que se elija (WiFi, Wimax, Xbee y Zigbee). Sería interesante realizar la implementación del sistema [CACC](#) para cada uno de estas tecnologías de comunicación inalámbrica, determinando a través de los resultados, cual de ellas es la mejor.

Por último, otra línea de investigación futura recae en el seguimiento del vehículo delantero también en velocidad angular. Este hecho permitirá un mayor confort para el usuario en la tarea de la conducción. Pudiendo realizar otras tareas, siempre que el vehículo se encuentre en el interior de una cadena.

Bibliografía

- [Asaoka and Ueda, 1996] Asaoka, A. and Ueda, S. (1996). An experimental study of a magnetic sensor in an automated highway system. In *Intelligent Vehicles Symposium*, pages 373–378.
- [de Fuentes et al., 2012] de Fuentes, J., González-Tablas, A., Hernández-Ardieta, J., and Ribagorda, A. (2012). Towards an automatic enforcement for speeding: enhanced model and intelligent transportation systems realisation. In *Intelligent Transport Systems, IET*, pages 270–281.
- [Geiger et al., 2012] Geiger, A., Lauer, M., Moosmann, F., Ranft, B., Rapp, H., Stiller, C., and Ziegler, J. (2012). Team annieways entry to the 2011 grand cooperative driving challenge. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3):1008–1017.
- [Güvenç et al., 2012] Güvenç, L., Uygan, I., Kahraman, K., Karaahmetoglu, R., Altay, I., Sentürk, M., Emirler, M. T., Karci, A., Güvenç, B., E. Altug, Turan, M., Tas, O., Bozkurt, E., Özgüner, U., Redmill, K., Kurt, A., and Efendioglu, B. (2012). Cooperative adaptive cruise control implementation of team mekar at the grand cooperative driving challenge. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3):1062–1074.
- [Huang and Ren, 1997] Huang, S. and Ren, W. (1997). Design of vehicle following control systems with actuator delays. *Int. J. Syst. Sci.*, 28(2):145–151.
- [Huppe et al., 2003] Huppe, X., Lafontaine, J., Beauregard, M., and Michaud, F. (2003). Guidance and control of a platoon of vehicles adapted to changing environment conditions. *Proc. IEEE Int. Conf. Syst.*, 4:3091–3096.
- [Ioannou and Chien, 1993] Ioannou, P. and Chien, C. (1993). Ieee trans. veh. technol. *Proc. IEEE Int. Conf. Syst.*, 42(4):657–672.
- [Ioannou and Chien, 2002] Ioannou, P. and Chien, C. (2002). R. rajamani and c. zhu. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 51(5):1186–1192.
- [Jerath and Brennan, 2012] Jerath, K. and Brennan, S. (2012). Analytical prediction of selforganized traffic jams as a function of increasing acc penetration. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(4):1782–1791.
- [Kesting et al., 2010] Kesting, A., Treiber, M., and Helbing, D. (2010). Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity. Technical report, Institute for Transport and Economics, Dresden, Germany.
- [Khatir and Davison, 2004] Khatir, M. and Davison, E. (2004). Decentralized control of a large platoon of vehicles using nonidentical controllers. In *Proc. Amer. Control Conf.*, pages 2769–2776.

- [Kianfar et al., 2012] Kianfar, R., Augusto, B., Ebadighajari, A., Hakeem, U., Nilsson, J., Raza, A., Tabar, R., Irukulapati, N., Englund, C., Falcone, P., Papanastasiou, S., Svensson, L., and Wymeersch, H. (2012). Design and experimental validation of a cooperative driving system in the grand cooperative driving challenge. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3):994–1007.
- [Liang and Peng, 1999] Liang, C. and Peng, H. (1999). Adaptive cruise control with guaranteed string stability. *Veh. Syst. Dyn.*, 32(4):313–330.
- [Lidström et al., 2012] Lidström, K., Sjöberg, K., Holmberg, U., Anderson, J., Bergh, F., Bjäde, M., and Mak, S. (2012). A modular cacc system integration and design. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3):1050–1061.
- [Liu et al., 2001] Liu, X., Goldsmith, A., Mahal, S., and Hedrick, J. (2001). Effects of communication delay on string stability in vehicle platoons. *Proc. IEEE Intl. Conf. Intell. Trans. Systems*, 15(1):625–630.
- [Lucas and Guettier, 2012] Lucas, F. and Guettier, C. (2012). Hybrid solving technique for vehicle planning with communication constraints. In *MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE, 2012 - MILCOM 2012*, pages 1–6.
- [Milanés et al., 2012] Milanés, V., Villagrà, J., Pérez, J., and González, C. (2012). Low-speed longitudinal controllers for mass-produced cars: A comparative study. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(1).
- [Moon et al., 2009] Moon, S., Moon, I., and Yi, K. (2009). Design, tuning and evaluation of a full-range adaptive cruise control system with collision avoidance. In *Control Engineering Practice 17*, pages 442–455.
- [Mu et al., 2010] Mu, H., Yu, J., and Liu, L. (2010). Traffic signals control of urban traffic intersections group based on fuzzy control. In *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2010 Seventh International Conference on*, pages 763–767.
- [Naranjo et al., 2006] Naranjo, J., González, C., García, R., and de Pedro, T. (2006). Acc+stop and go maneuvers with throttle and brake fuzzy control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(2).
- [Naus et al., 2010a] Naus, G., Ploeg, J., de Molengraft, M. V., Heemels, W., and Steinbuch, M. (2010a). Design and implementation of parameterized adaptive cruise control: An explicit model predictive control approach. In *Control Engineering Practice 18*, pages 882–892.
- [Naus et al., 2010b] Naus, G., Vugts, R., Ploeg, J., van de Molengraft, R., and Steinbuch, M. (2010b). Cooperative adaptive cruise control and design and experiments. *American Control Conference*.
- [Naus et al., 2010c] Naus, J., Vugts, P., Ploeg, J., van de Molengraft, J., and Steinbuch, M. (2010c). String-stable cacc design and experimental validation: A frequency-domain approach. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 59(9):4268–4279.
- [Nieuwenhuijze et al., 2012] Nieuwenhuijze, M., van Keulen, T., Öncü, S., Bonsen, B., and Nijmeijer, H. (2012). Cooperative driving with a heavy-duty truck in mixed traffic: Experimental results. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3):1026–1032.
- [Nowakowski and Shaladover, 2011] Nowakowski, C. and Shaladover, S. (2011). Cooperative adaptive cruise control: Testing drivers' choices of following distances. Technical report, California PATH Research Report.

- [Obradovic et al., 2007] Obradovic, D., Lenz, H., and Schupfner, M. (2007). Fusion of sensor data in siemens car navigation system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(1).
- [Öncü et al., 2014] Öncü, S., Ploeg, J., van de Wouw, N., and Nijmeijer, H. (2014). Cooperative adaptive cruise control: Networkaware analysis of string stability. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(4):1527–1537.
- [Peppard, 1974] Peppard, L. (1974). String stability of relative-motion pid vehicle control systems. *IEEE Trans. Autom. Control*, 19(5):579–581.
- [Ploeg et al., 2011] Ploeg, J., Scheepers, B., Nunen, E., van de Wouw, N., and Nijmeijer, H. (2011). Design and experimental evaluation of cooperative adaptive cruise control. In *Proc. IEEE Intell. Transp. Syst. Conf.*, pages 260–265.
- [Reijmers et al., 1995] Reijmers, H., Özgüzel, M., and Prasad, R. (1995). Performance analysis of a communication network for intelligent transport systems. Technical report, Telecommunications and TrafficControl Systems Group , Delft University of Technology.
- [Ren and Green, 1994] Ren, W. and Green, D. (1994). Continuous platooning: A new evolutionary and operating concept for automated highway systems. In *American Control Conference*, pages 21–25.
- [Santos et al., 2014] Santos, H., Jr., M. M., and Espinosa, F. (2014). Adaptive self-triggered control of a remotely operated robot. Technical report, Electronics Department, University of Alcalá (Spain) and INCAS3, Assen (The Netherlands) and University of Groningen (The Netherlands).
- [Serafin, 1996] Serafin, C. (1996). Driver preferences and usability of adjustable distance controls for an adaptive cruise control (acc) system. Technical report, National Highway Traffic Safety Administration.
- [Shaw and Hedrick, 2007a] Shaw, E. and Hedrick, J. (2007a). String stability analysis for heterogeneous vehicle strings. In *Proc. Amer. Control Conf*, pages 3118–3125.
- [Shaw and Hedrick, 2007b] Shaw, E. and Hedrick, J. (2007b). String stability analysis for heterogeneous vehicle strings. In *American Control Conferences. ACC'07*, pages 3188–3125.
- [Sheikholeslam and Desoer, 1993] Sheikholeslam, S. and Desoer, C. (1993). Longitudinal control of a platoon of vehicles with no communication of lead vehicle information: A system-level study. *IEEE Trans. Veh. Technol*, 42(4):546–554.
- [Shladover et al., 2010] Shladover, S., Nowakowski, S., O’Connel, C., and Cody, J. (2010). Cooperative adaptive cruise control: driver selection of carfollowing gaps. Technical report, 17th ITS World Congress.
- [Shladover et al., 2012] Shladover, S., Su, D., and Lu, X. (2012). Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow. *Transportation Research Record*, pages 63–70.
- [Swaroop, 1997] Swaroop, D. (1997). String stability of interconnected systems: An application to platooning in automated highway systems. Technical report, University of California, Berkeley, CA, USA. PATH.
- [Swaroop et al., 1994] Swaroop, D., Hedrick, J., Chien, C., and Ioannou, P. A. (1994). A comparison of spacing and headway control strategy for automatically controlled vehicles. *Veh. Syst. Dyn.*, 23(8):597–625.

- [Thomson, 2000] Thomson, I. (2000). Algunos conceptos básicos referentes a las causas y soluciones del problema de la congestión de tránsito. Technical report, CEPAL, Santiago de Chile.
- [Urban et al., 2004] Urban, M., Blaho, M., Murgas, J., and Folt, M. (2004). Simulation of networked control systems via truetime. Technical report, Institute of control and industrial informatics. Slovak University of Technology. Bratislava (Slovak Republic).
- [V. Milanés et al., 2014] V. Milanés, S. S., Spring, J., Nowakowski, C., Kawazoe, H., and Nakamura, M. (2014). Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(1):296–305.
- [van Arem et al., 2012] van Arem, B., van Driel, C., and Visser, R. (2012). The impact of cooperative adaptive cruise control on trafficflow characteristics. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13:1018–1025.
- [van Nunen et al., 2012] van Nunen, E., Kwaakkernat, M., Ploeg, J., and Netten, B. (2012). Cooperative competition for future mobility. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3):1018–1025.
- [van Willigen et al., 2011] van Willigen, W., Schut, M., and Kester, L. (2011). Approximating safe spacing policies for adaptive cruise control strategies. *Vehicular Networking Conference*.
- [Varaiya, 1993] Varaiya, P. (1993). Smart cars on smart roads. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38(2).
- [Wada et al., 2003] Wada, M., Yoon, K., and Hashimoto, H. (2003). Development of advanced parking assistance system. In *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, pages 4–17.
- [Weinberger et al., 2001] Weinberger, M., Winner, H., and Bubb, H. (2001). Adaptive cruise control field operational test: The learning phase. In *JSAE*, pages 487–494.
- [Wu et al., 2012] Wu, N., Lou, Y., Sun, N., Wang, W., and Ogai, H. (2012). Automatic driving system by small electric vehicle for elderly person. In *SICE Annual Conference (SICE), 2012 Proceedings of*, pages 232–235.
- [Yanakiev and Kanellakopoulos, 1998] Yanakiev, D. and Kanellakopoulos, I. (1998). Nonlinear spacing policies for automated heavy-duty vehicles. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 47(4):1365–1377.